CAPSULA ESPACIAL

Revista digital de astronáutica y espacio

Nº 86 - 2023

www.capsula-espacial.blogspot.com

Atmósferas del Sistema Solar

Consideraciones generales

Atmósferas planetarias

Atmósferas lunares

Estimados lectores

Bienvenidos a un viaje a través de las distintas atmósferas que existen en nuestro Sistema Solar, una gran variedad que van desde lugares donde, por grandes presiones, calor o frío sería imposible alguna forma de vida y otros donde son similares a nuestro planeta primigenio, un número cuyo contenido es apasionante y que sirve también para amplios debates sobre la formación de vida en lugares tan distantes de la Tierra, los invito a disfrutar del mismo.

Para la creación de nuevos contenidos, usted puede colaborar con la revista a través de los botones de donación que posee el Blog.

Muchas gracias

Biagi, Juan

Contacto



www.capsula-espacial.blogspot.com



www.instagram.com/capsula_espacial/



r.capsula.espacial@gmail.com

Portada: Fotografía desde la sonda Juno de la intrincada atmósfera de Júpiter. (NASA)

Contenido

Vientos

Sonda MAVEN

Atmósfera de Ceres (planeta enano)

Atmósfera de Júpiter

Troposfera

Termosfera

Bandas atmosféricas

Gran Mancha Roja (GRS)

Tormentas y relámpagos

Ciclones circumpolares (CPC)

Sonda de Reentrada Atmosférica (Misión Galileo)

Atmósfera de Europa (luna de Júpiter)

Atmósfera de Ío (luna de Júpiter)

Atmósfera de Callisto (luna de Júpiter)

Atmósfera de Ganímedes (luna de Júpiter)

Atmósfera de Saturno

Capas de nubes

Vientos

Clima

Auroras

Atmósfera de Titán (luna de Saturno)

Troposfera

Estratosfera

Mesosfera

Termosfera

Ionosfera

Sobrevuelos

Sonda de Reentrada Atmosférica Huygens

Atmósfera de Enceladus (luna de Saturno)

Consideraciones generales

La materia en estado gaseoso que rodea a un cuerpo celeste se denomina atmósfera (en el caso del Sol se denomina atmósfera a la capa gaseosa situada por encima de la fotosfera, aunque ésta sea también gaseosa).

Las atmósferas pueden haberse formado de diferentes modos, en primer lugar, durante la condensación del planeta, existe la posibilidad de que se haya capturado gas de la nebulosa solar; que escapara poco a poco gas del interior del cuerpo sólido, como también existe la posibilidad de que el planeta pudo haber capturado en un momento determinado de su formación, un cometa de tamaño considerable, que al calentarse, se vaporizó y se transformó en la atmósfera.

La composición atmosférica determina notablemente su estructura térmica y su dinámica; la energía que se transforma en la atmósfera procede de lo que el Sol envía al planeta y de lo que éste cede a su atmósfera; a ello se une la energía derivada de la rotación del planeta, y lo que directa o indirectamente añade el viento solar.

El estudio de las atmósferas de los planetas y sus lunas comienza con la recolección de información básica, como composición química, presión y variación de la temperatura con la altitud, luego, consiste en explicar el transporte de calor, dinámica, historia y evolución.

Para resolver estas cuestiones, y con el fin de llegar a afirmaciones seguras, es preciso emplear un amplio espectro de métodos; el modelo más sencillo de una atmósfera se obtiene cuando se supone la existencia de un equilibrio hidrostático, tal suposición no se ajusta a la realidad, ya que una atmósfera está constituida por un complejo sistema de procesos físicos y químicos en equilibrio dinámico; estos procesos adquieren importancia diferente según la densidad (altitud), la idea del equilibrio hidrostático nos lleva a una disminución potencial de la densidad con la altura; esta disminución se describe con la ayuda de la escala de altitudes, que representa al mismo tiempo la relación entre la gravedad y energía térmica; de este modo se llega a una división atmosférica en capas, dominando los gases pesados en las capas inferiores y los gases ligeros en las capas superiores.

En general, los planetas pueden ser clasificados como cuerpos sin aire (agregados más o menos esféricos que no tienen atmósferas sensibles) como la Luna o Mercurio; planetas con atmósferas ligeras sus atmósferas serán pequeñas en masa en relación a la masa del cuerpo rocoso; los planetas con atmósferas masivas presentarán una composición que constará de un núcleo duro comprimido, posiblemente una corteza de hielo; una corteza interna comprimida de Hidrógeno metálico (en los planetas muy masivos), y una atmósfera gaseosa exterior de Hidrógeno y helio, además de cantidades relativamente menores de otros gases.

Un planeta de tamaño menor a nuestro planeta tendería a acumular menos calor por medio de la compresión gravitatoria durante el período de formación; su razón de superficie a masa sería mayor, de aquí que, para una temperatura interna dada y una conductividad térmica de las rocas, se podría desprender calor rápidamente; los planetas mas pequeños del Sistema Solar pueden también tender a poseer menos concentración de metales en el centro, haciendo la conductividad térmica de las partes exteriores más grande; así los planetas pequeños deben tener temperaturas internas más bajas que los planetas masivos.

Los planetas con atmósferas densas y fuertes vientos superficiales, particularmente aquellos con componentes atmosféricos que pueden experimentar un cambio de estado a las temperaturas reinantes, tenderán a originar una erosión extensa y un transporte horizontal de las rocas de la corteza que le son expuestas, esto induce a trastornar el equilibrio isostático en la corteza y puede tender a aumentar la actividad volcánica.

Atmósfera solar

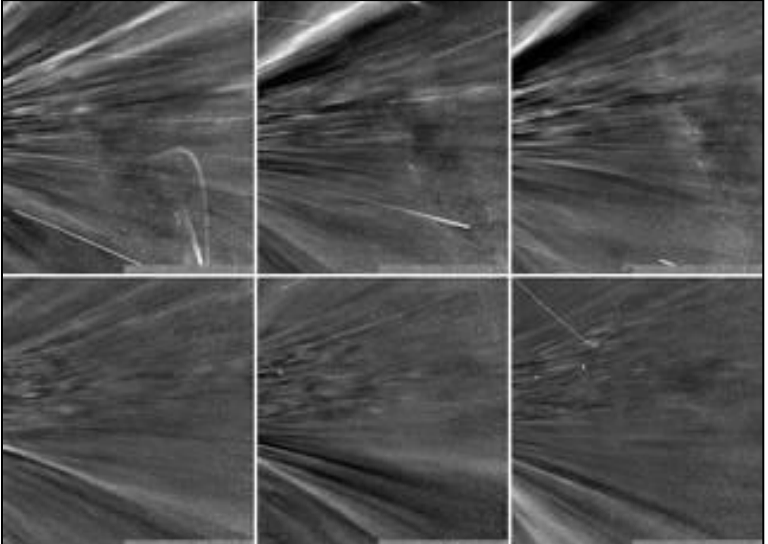
El Sol no tiene una superficie sólida, tiene una atmósfera sobrecalentada hecha de material unido a la estrella por la gravedad y las fuerzas magnéticas; a medida que el calor y la presión crecientes empujan ese material lejos del Sol, llega a un punto donde la gravedad y los campos magnéticos son demasiado débiles para contenerlo, ese punto -conocido como la superficie crítica de Alfvén- marca el final de la atmósfera del Sol y el comienzo del viento solar; el material solar con la energía para cruzar ese límite se convierte en el viento solar, que arrastra el campo magnético del Sol con él mientras corre a través del Sistema Solar; más allá de la superficie crítica de Alfvén, el viento solar se mueve tan rápido que las olas dentro del viento nunca pueden viajar lo suficientemente rápido como para regresar al Sol, cortando su conexión.

Hasta ahora, los investigadores no estaban seguros de dónde se encontraba exactamente la superficie crítica de Alfvén; basados en imágenes remotas de la Corona solar, las estimaciones se colocaban entre 6 y 14 millones de Km; el 28-04-2021, la sonda Parker Solar Probe durante su octavo sobrevuelo del Sol, encontró las condiciones específicas magnéticas y de partículas a alrededor de 13 millones de Km sobre la superficie solar, demostrando a los científicos que había cruzado la superficie crítica de Alfvén por primera vez y entraba en la atmósfera solar.

Durante el sobrevuelo, la sonda Parker Solar Probe entró y salió de la corona solar varias veces, sugiriendo que la superficie crítica de Alfvén no tiene la forma de una bola lisa, tiene picos y valles que arrugan la superficie; descubrir dónde se alinean estas protuberancias con la actividad solar proveniente de la superficie, puede ayudar a los científicos a aprender cómo los eventos en el Sol afectan la atmósfera y el viento solar, cuando la sonda Parker Solar Probe descendió a alrededor de 10 millones de Km desde la superficie solar, transitó por una característica de la Corona llamada pseudoserpentina (estructuras masivas que se elevan por encima de la superficie solar y se pueden ver desde la Tierra durante los eclipses solares) dentro de la pseudoserpentina, las condiciones se calmaron (las partículas que la nave generalmente encuentra en el viento solar se desaceleraron).

Por primera vez, la nave espacial se encontró en una región donde los campos magnéticos eran suficientemente fuertes como para dominar el movimiento de partículas, condiciones que fueron la prueba definitiva de que había pasado la superficie crítica de Alfvén y entró en la atmósfera solar donde los campos magnéticos dan forma al movimiento de todo en la región.



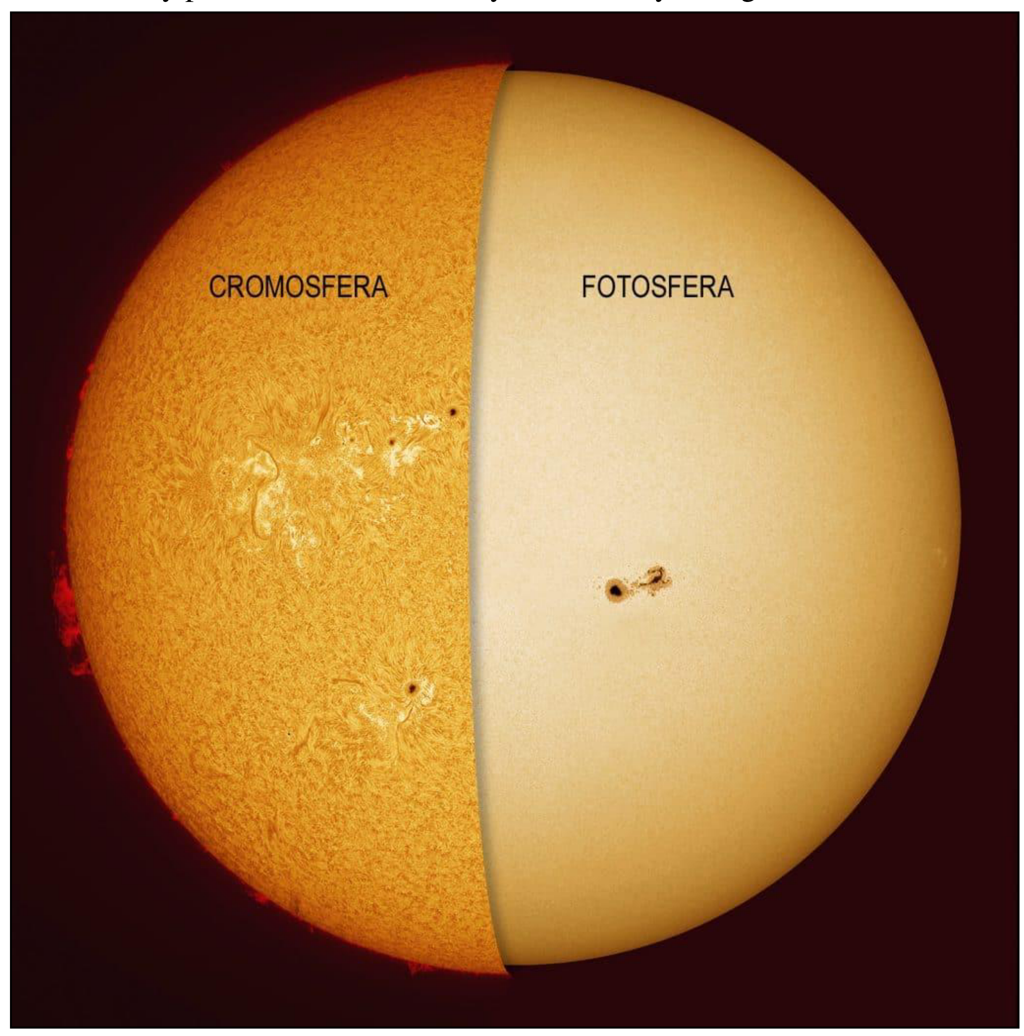


Fotosfera

El Sol se compone de cierto número de capas concéntricas, pero todo lo que puede observarse por medios ópticos, o registrarse con instrumentos, es la cubierta exterior, llamada, a veces, atmósfera solar; nada se sabe del interior del Sol por observación directa, pero es posible obtener o deducir algunas propiedades sobre su estructura.

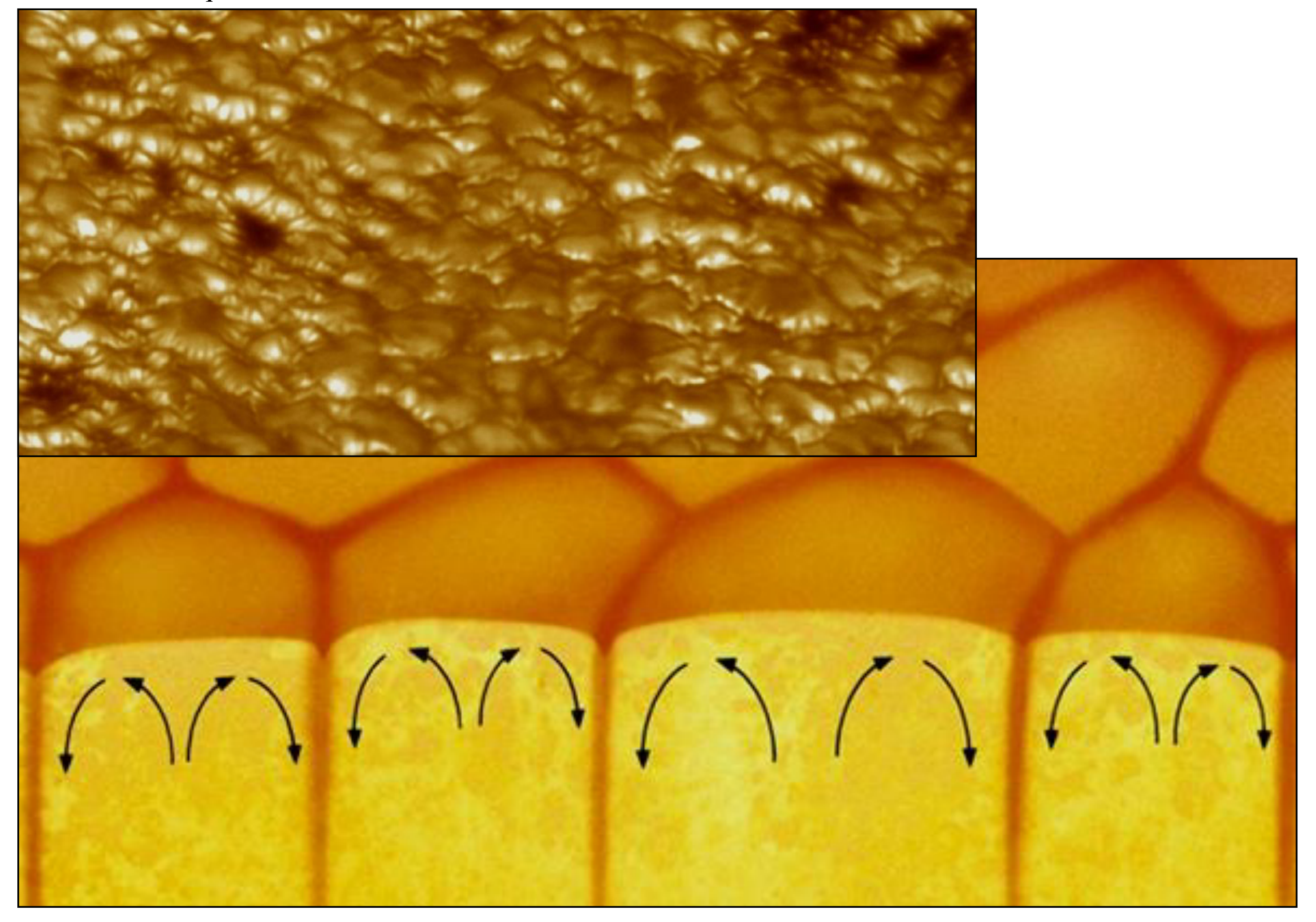
La parte visible del Sol o que puede fotografiarse en condiciones normales se llama fotosfera y constituye una capa relativamente delgada de la atmósfera solar (400 Km de espesor) que emite casi todo el calor y la luz que llegan a la Tierra, examinando una fotografía del disco solar, tomada con película cuya sensibilidad es análoga a la del ojo humano, se ve que la fotosfera es algo oscura en los bordes (limbo) que en el centro, un observador en la superficie terrestre con instrumentos ópticos especiales y con sus correspondientes filtros solares puede ver hasta cierta distancia dentro de la fotosfera.

La radiación procedente de la parte situada a más profundidad no se ve a causa de la absorción que experimenta al atravesar la fotosfera, para que la radiación en el borde, atraviese la misma distancia a través de la fotosfera, es preciso que tenga su origen en un punto más alejado del centro del Sol, el hecho de que aparezca el limbo más oscuro se debe a que la temperatura es más baja, de aquí hay que deducir que la temperatura de la fotosfera no es uniforme, sino que disminuye hacia afuera, se ha estimado que a una profundidad de unos 300 Km desde la superficie de la fotosfera (nivel más bajo desde el cual las radiaciones solares pueden alcanzar directamente la Tierra) la temperatura es muy próxima a los 7230 °C, y va disminuyendo gradualmente hasta unos 4430 °C.



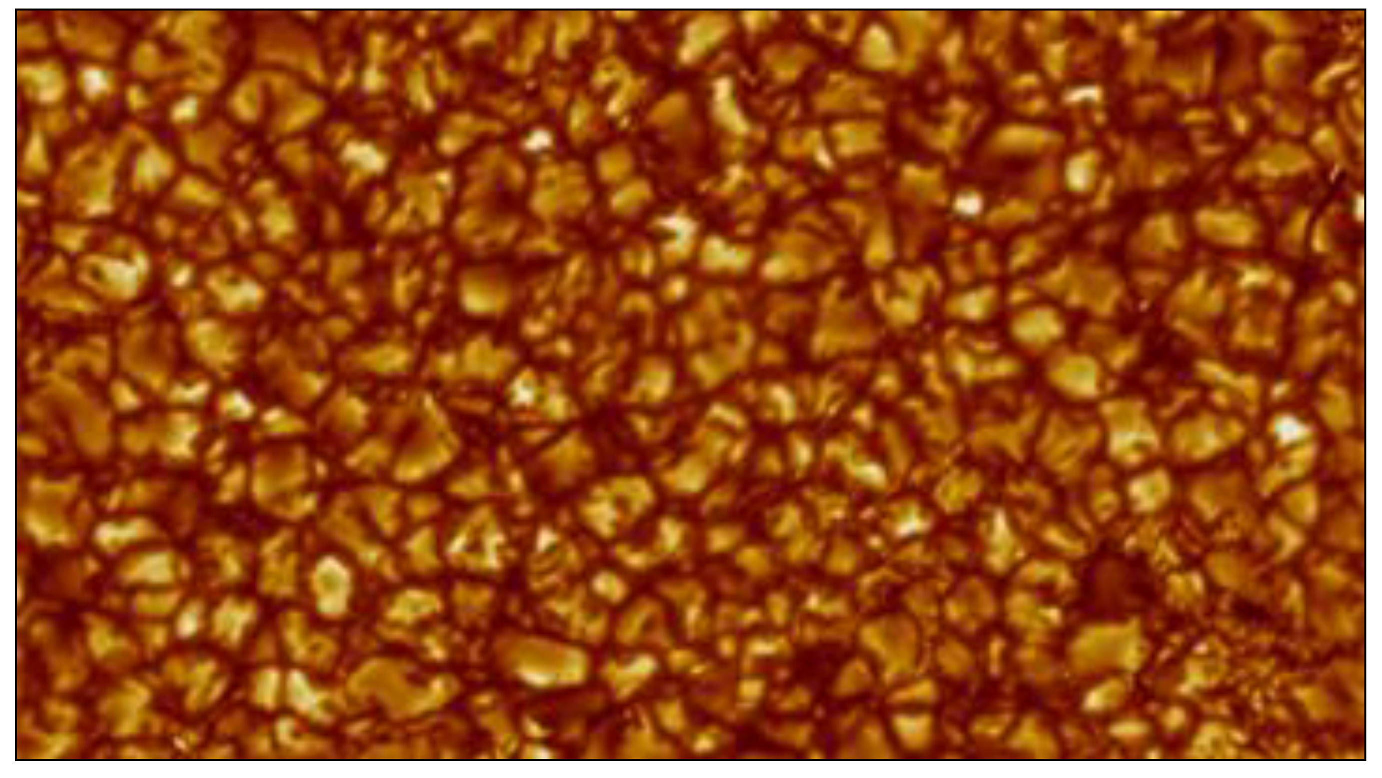
Del examen detallado de fotografías, se desprende que la base de la fotosfera solar está constituida por un gran número de zonas brillantes en forma de polígonos irregulares, de una anchura aproximada de 300 a 1500 Km, separados por estrechas fajas oscuras, la diferencia en el brillo indica que las zonas más luminosas tienen una temperatura de unos 200 °C más alta que la de las zonas más oscuras, los gránulos brillantes no son estacionarios, sino que cambian continuamente de forma, con una vida media de unos 4 minutos, comparando los espectros de rayas de Fraumhofer de las regiones más luminosas y más oscuras, se ve que hay un claro corrimiento Doppler de frecuencia, lo que indica que tales regiones se mueven una con respecto a otra, las zonas granuladas brillantes se desplazan hacia arriba, es decir, desde el centro del Sol hacia afuera, mientras que las zonas intergranulares lo hacen hacia adentro, la velocidad relativa varía de uno a otro gránulo, pero se puede tomar como valor medio una velocidad algo superior a 0,8 Km/seg.

La apariencia granular de la superficie solar se considera como prueba evidente de que existen corrientes de convección en la región opaca situada inmediatamente debajo de la fotosfera, la convección tiene lugar, cuando la capa más baja de un fluido (líquido o gas) se calienta y se dilata, debido a esta expansión, disminuye la densidad y la capa caliente sube a través del fluido por efecto del campo gravitatorio, al mismo tiempo, las capas superiores no calentadas (que poseen una mayor densidad) descienden, se hunden, en el fluido, el resultado es una especie de circulación acompañada de una transferencia de calor en la masa fluida, desde las zonas más bajas y calientes a las superiores y frías, los gránulos brillantes de la superficie solar representan, evidentemente, la cima de columnas ascendentes de gases que ha calentado la energía interna del Sol, las regiones más oscuras, intergranulares, son las masas más frías, que se mueven hacia el interior.



Una propiedad importante de la fotosfera es su espectro característico de rayas oscuras, la gran mayoría de estas rayas de absorción se deben a las transiciones de electrones en los átomos, pero también espectros de bandas de unas 14 moléculas (o cuasi moléculas) sencillas, las rayas de Fraunhofer son características de los elementos presentes en la fotosfera y en las capas más bajas de la cromosfera, un detallado examen del espectro durante más de un siglo ha revelado la presencia en la fotosfera solar de 60 a 70 de los 90 elementos que existen en la Tierra, es probable que muchos (si no todos) de los otros elementos existan también en el Sol, pero por una u otra razón no han sido aún identificados, lo cual puede deberse a la tenuidad de las rayas, que son de longitudes de onda no accesibles al análisis, a la complejidad del espectro de Fraunhofer, con más de 25000 rayas, midiendo la intensidad de las distintas rayas espectrales y teniendo en cuenta las transiciones electrónicas probables, se puede calcular aproximadamente la proporción en que entran en la fotosfera muchos de sus elementos componentes, comparada con la composición química de la corteza terrestre pone de manifiesto que la proporción de los elementos más pesados (de peso atómico ≥ que el del Sodio) es la misma en la fotosfera solar que en la Tierra, los elementos más ligeros, como el Hidrógeno y Helio son en cambio mucho más abundantes en el Sol, el 90% de los átomos de la fotosfera es Hidrógeno; el Helio constituye un 9,9 %, mientras que los elementos más pesados representan aprox. el 0,1 % de los átomos, la gran proporción de Hidrógeno y Helio en la atmósfera solar se atribuye, en cierto grado, al campo gravitatorio tan intenso del Sol, que impide el escape de los átomos ligeros.

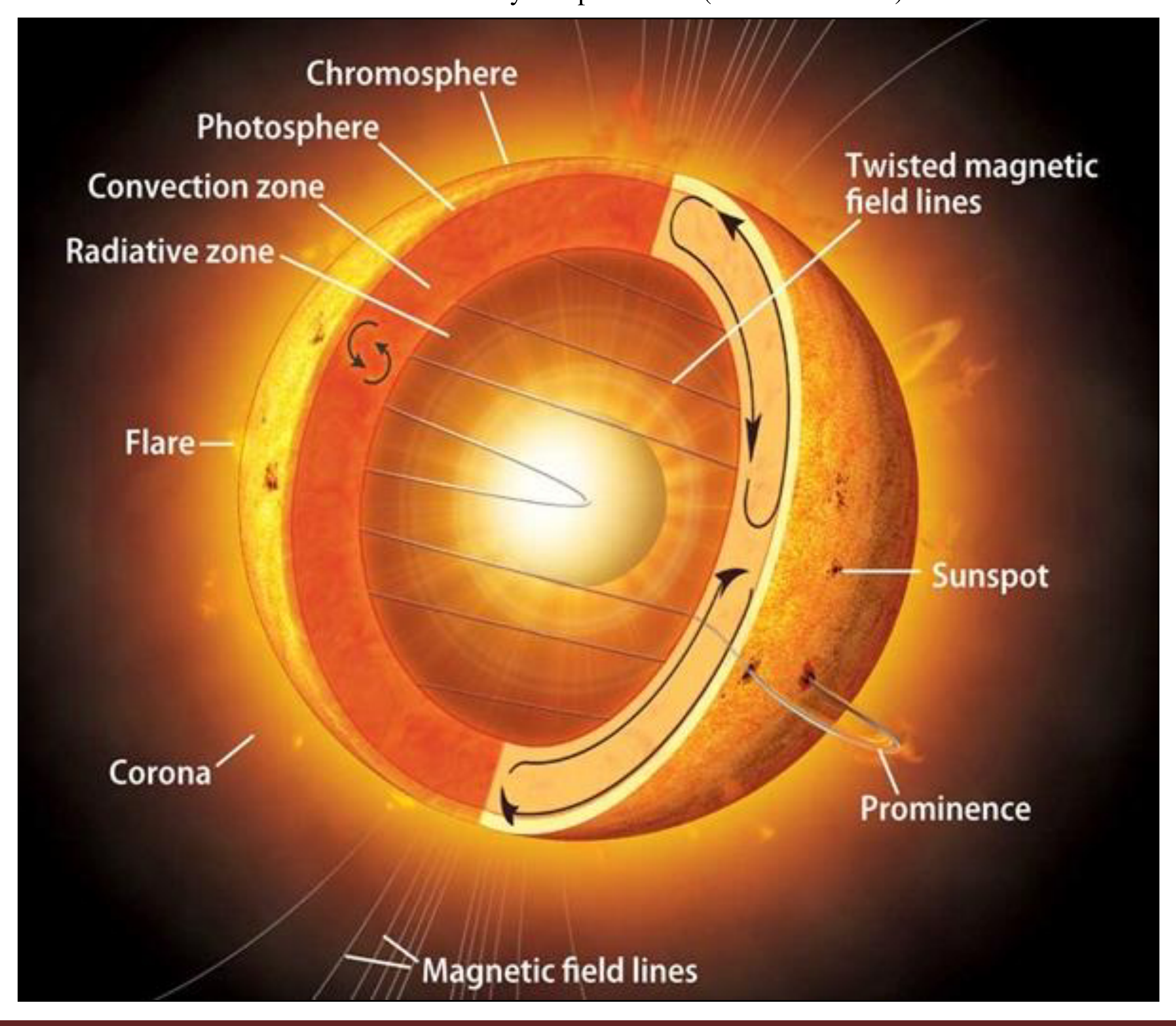
La variación de temperatura con la profundidad en la fotosfera se ha podido estimar por observaciones del oscurecimiento del limbo solar, gracias a mediciones de esta clase hechas entre límites cercanos de longitudes de onda en el espectro continuo y al estudio de las características de las rayas de Fraunhofer, se ha podido calcular la densidad y la presión en la fotosfera, la densidad en la base de esta última capa es aproximadamente de 10^{-7} g/cm^3, en cuanto a la presión en la fotosfera viene a ser la décima parte de la presión normal de la atmósfera terrestre, y puesto que la gravedad en la superficie solar es unas 30 veces la de la Tierra, la masa total de gas sobre la unidad de superficie de la fotosfera será unas 300 veces menor que sobre la misma unidad de superficie en la Tierra, pero la superficie del Sol es tan grande que la masa total de su atmósfera es de unas 1,5 x 10^7 tn, lo que, en esencia, representa la masa de la fotosfera, ya que las densidades de la cromosfera y de la corona son extraordinariamente bajas.

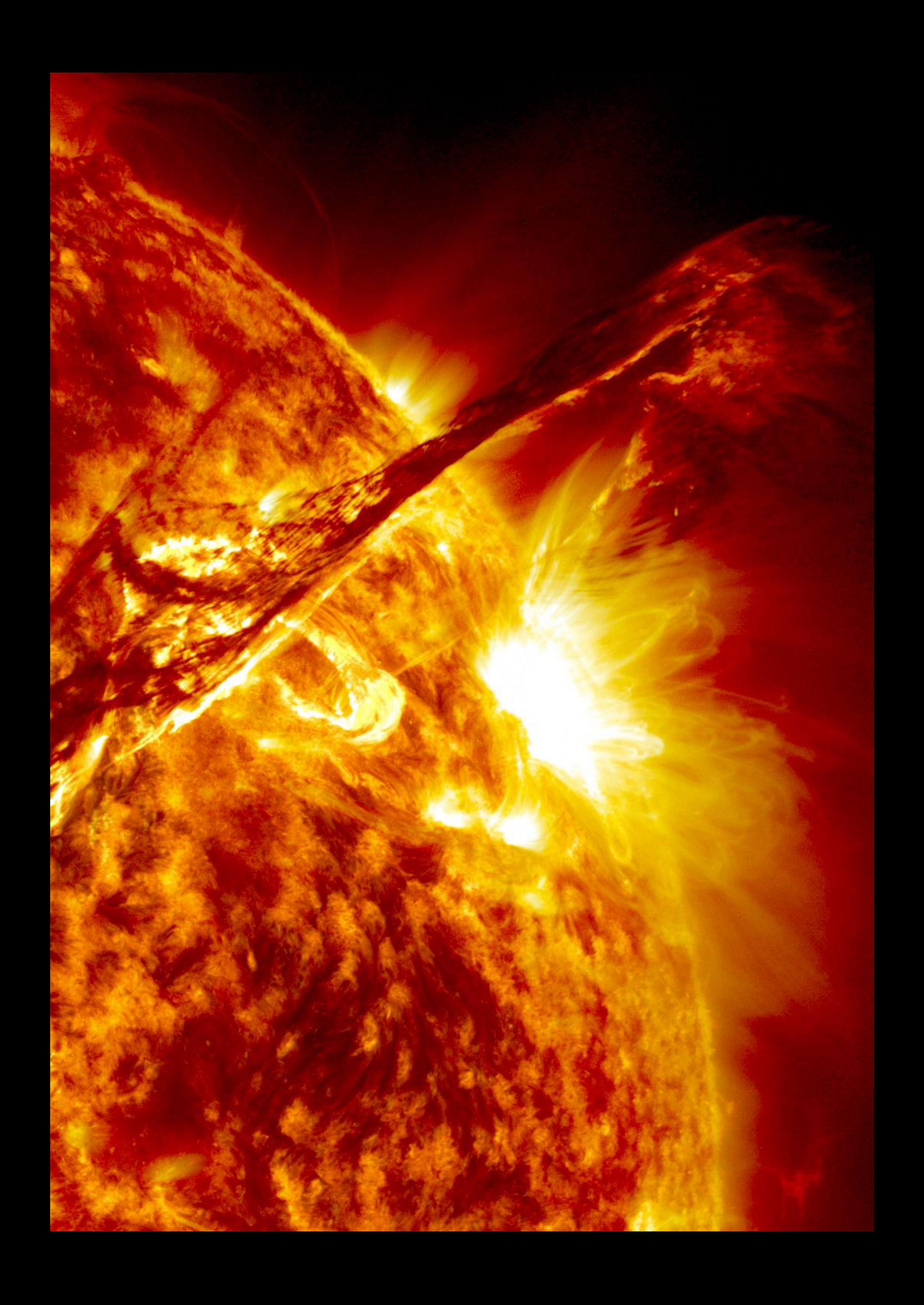


Cromosfera

En sus capas más profundas, la fotosfera se mezcla con una zona opaca llamada covectiva, mientras que sus capas más altas se introducen en la cromosfera, que es una zona virtualmente transparente y de muy poca densidad, que se extiende por fuera de la fotosfera, muy poca radiación solar nos llega directamente de la cromosfera, que, por ser transparente, transmite casi toda la radiación fotosférica, como regla general, puede decirse que la cromosfera solamente es visible durante los eclipses totales de Sol, en que la fotosfera está oculta por la Luna, un momento antes de la plenitud del eclipse, se ve la cromosfera como una lúnula o arco muy fino, de color rojizo; a este color debe su nombre la cromosfera (del griego chroma, color) en condiciones normales, la intensidad de la luz visible procedente de la fotosfera hace imposible observar la radiación (mucho más débil) emitida por la cromosfera, no obstante, existen técnicas especiales para poder estudiar esta aunque no sea en ocasión de un eclipse solar.

El espesor total de la cromosfera es de 10000 a 16000 Km; según las circunstancias, su temperatura (al contrario de lo que ocurre en la fotosfera), aumenta hacia afuera, desde unos 4400 °C en su nivel más profundo, donde se junta con la fotosfera, hasta 1000000 °C en su parte superior, la razón de este incremento de temperatura en la cromosfera al aumentar la altura es uno de los mayores problemas (aún no resueltos) de la física solar.

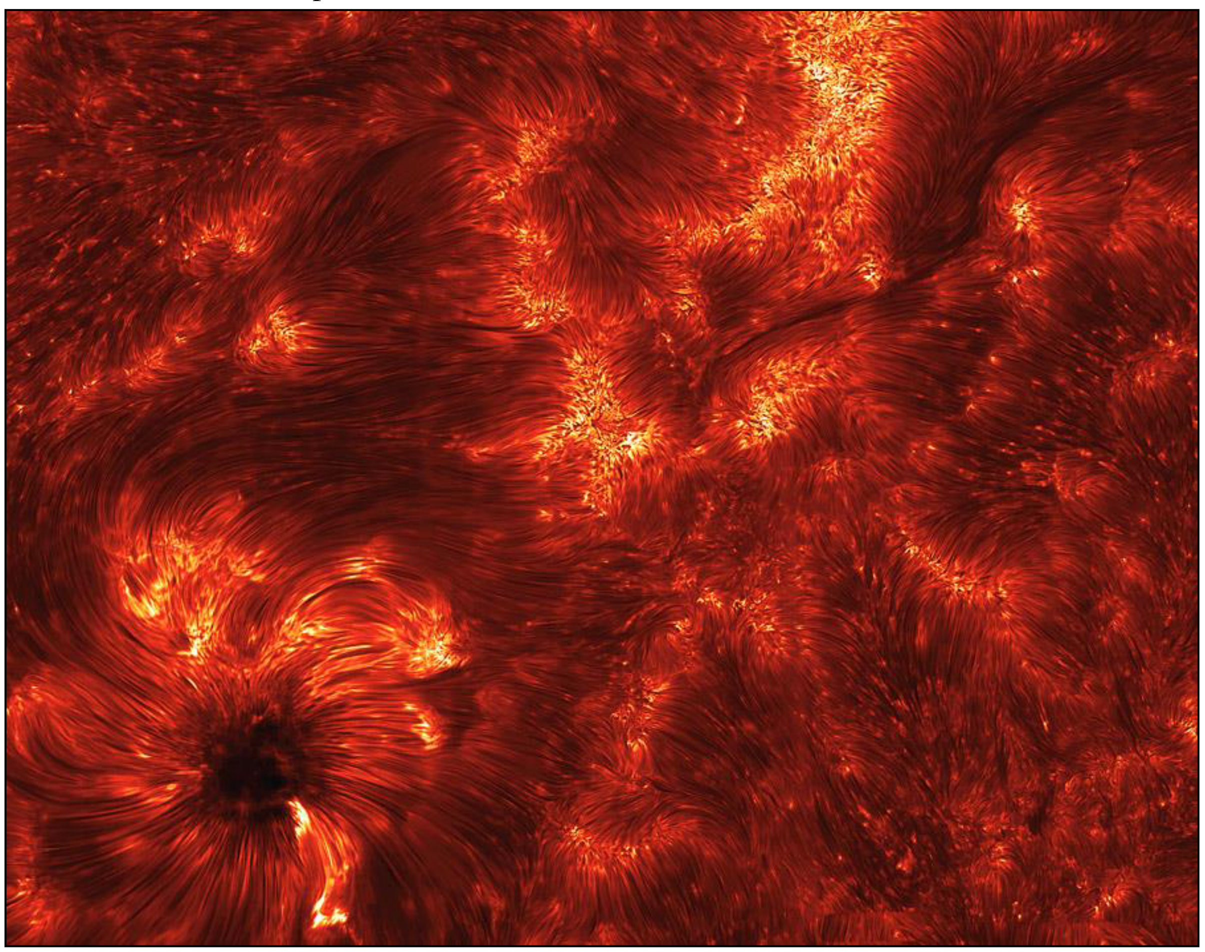




Espículas

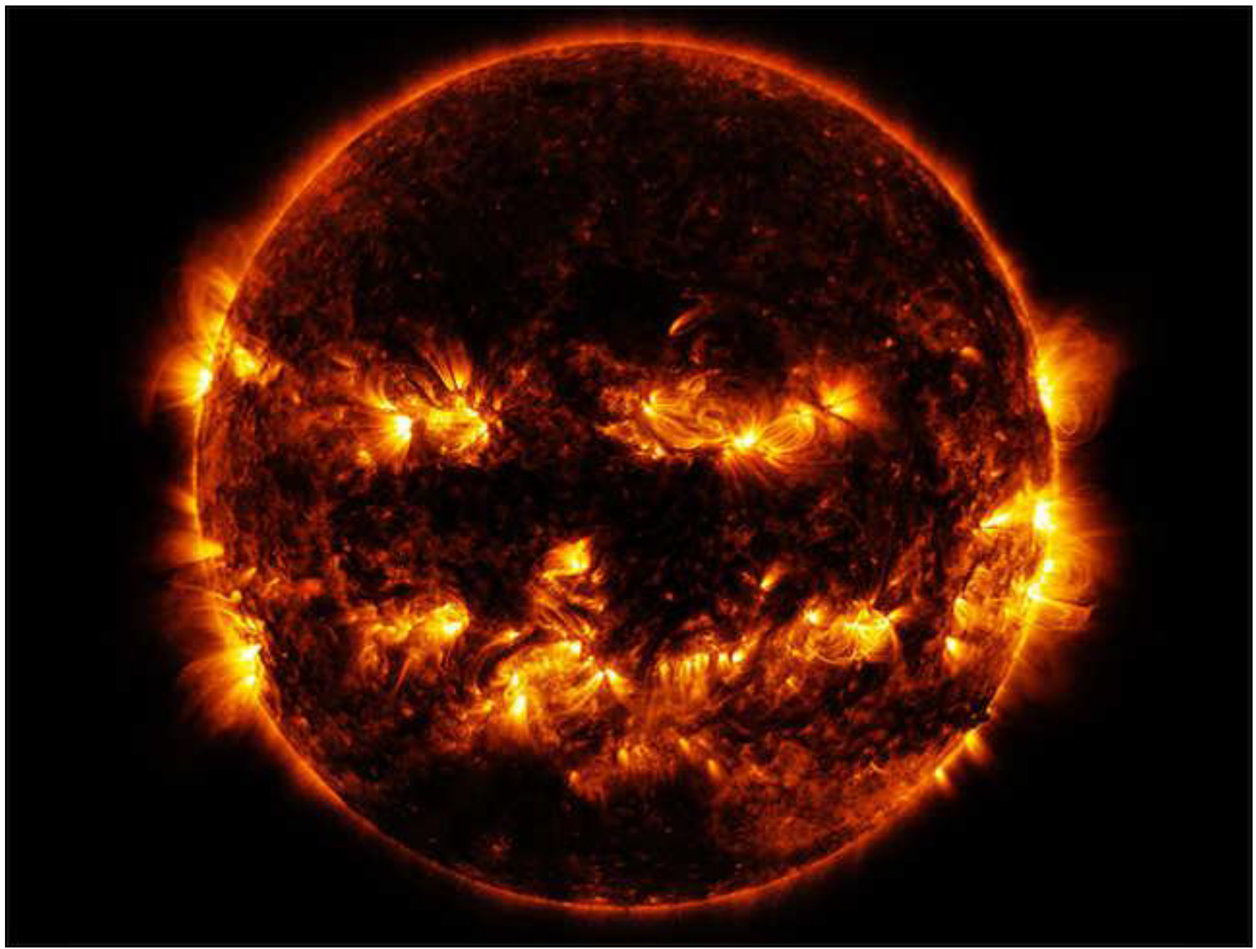
Las fotografías de la cromosfera (se ve generalmente en el perfil que sobresale del limbo solar en los eclipses) ponen de manifiesto que está compuesta por una región relativamente a nivel, de unos 3200/5000 Km de altura, coronada por un gran número de salientes llamados espículas, un fenómeno normal en la superficie solar, ya que se presentan en todo tiempo en las zonas no perturbadas; dada la poca frecuencia de los eclipses totales de Sol, se ha ideado una técnica especial para tomar fotografías del perfil de la cromosfera siempre con el cielo despejado, este método hace uso de un coronógrafo juntamente con un filtro que impide la llegada de toda luz, excepto una estrecha banda de 5 Å de ancho que enmarca la raya del Hidrógeno (tan destacada en el espectro de destello), las fotografías obtenidas de este modo son muy semejantes a las tomadas durante un eclipse, actualmente este método también lo tienen observatorios solares en órbita del Sol.

Las espículas que sobresalen del nivel principal de la cromosfera se ven ascender a velocidades de 25 a 32 Km/seg y llegan hasta alturas de 10000/16000 Km desde su base, el diámetro medio de las espículas es de unos 800 Km; después de alcanzar su altura máxima, la espícula parece permanecer estacionaria durante un corto período, para caer después, perder intensidad y debilitarse; la vida total de una espícula es de aprox. medio a varios minutos -con un promedio de 4 a 5 min-, se ha calculado que, en un instante dado, hay unas 100000 espículas que cubren un 19% de la superficie solar; probablemente las espículas guarden cierta relación con los gránulos brillantes de la fotosfera, que representan las regiones ascendentes de la zona convectiva, las dimensiones de las secciones transversales son semejantes, pero no se ha podido establecer ninguna otra conexión, se ha observado que las espículas se forman en la cromosfera independientemente de si hay o no manchas o actividad solar alguna; pero no se sabe si el número de espículas varía con la extensión o la intensidad de tal actividad.



Corona

Por encima de la cromosfera se extiende la corona, la cual se ve durante un eclipse total de Sol como un halo blanquecino que rodea al disco solar y que alcanza alturas de muchos millones de Km, la intensidad de la radiación que llega directamente de la corona es muy débil, menor aún que la procedente de la cromosfera, por esta razón, para que la corona sea visible es preciso que el disco solar esté oscuro, como ocurre en los eclipses, la invención del coronógrafo, que es un telescopio con un cono central pulimentado que refleja la radiación de la fotosfera, ha permitido estudiar las partes interiores más brillantes de la corona aun cuando no haya eclipse, se obtienen los mejores resultados si la atmósfera terrestre está despejada y limpia, porque la luz dispersada por las partículas de polvo interfiere con la muy débil precedente de la corona, se han hecho algunas observaciones con coronógrafos transportados a grandes alturas por globos o satélites.



Aparte de la verdadera corona, hay otra región denominada corona pulverulenta, el espectro de la corona pulverulenta o corona F, que es mas simétrica que la corona solar y es también visible a distancias considerables del Sol, el espectro de la corona F difiere, con mucho, del de la corona solar en cuanto se parece al de la fotosfera, incluso con las rayas oscuras de Fraunhofer, no existe duda alguna de que corona F es producida por la dispersión de la luz solar normal, es decir, de la procedente de la fotosfera, debida a partículas muy finas de polvo interplanetario esparcidas por todo el Sistema Solar, se ha calculado que el diámetro de estas partículas varía entre una fracción de mm y una micra, y que por término medio solamente hay una partícula en un volumen de unos 10^{13} cm^3 (puesto que la distancia de la Tierra al Sol es aproximadamente de 1,5 X 10^{13} cm, se deduce que, por término medio, hay menos de una partícula por cm^2 de sección recta en el espacio entre ambos astros) la Luz Zodiacal, que puede verse en el cielo en ciertas épocas del año, inmediatamente después del crepúsculo vespertino o antes del matutino, es probablemente una prolongación de la corona F.

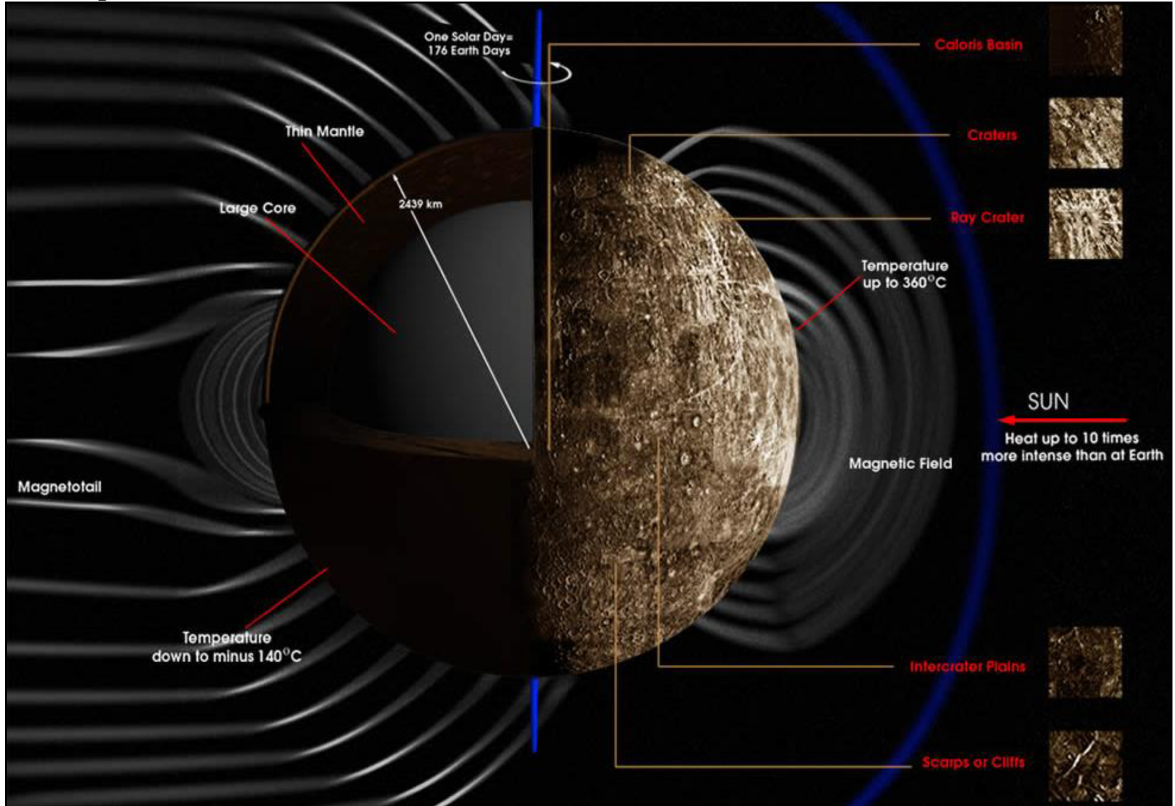
Atmósfera de Mercurio

Exosfera

La exosfera de Mercurio consta de una variedad de especies que se originan en el viento solar o en la corteza planetaria, sus primeros componentes descubiertos fueron el Hidrógeno atómico, Helio y Oxígeno atómico que se observaron por el fotómetro de radiación UV de la sonda Mariner-10 en su sobrevuelo de 1974; la concentración cercana a la superficie de estos elementos se estima que varía desde 230 cm^{-3} para el Hidrógeno a 44000 cm^{-3} para el Oxígeno, con una concentración intermedia de Helio; en 2008 la nave Messenger confirmó la presencia de Hidrógeno atómico, aunque su concentración parecía más alta que la estimada en 1974, se cree que el Hidrógeno y el Helio de la exosfera de Mercurio provienen del viento solar.

El Sodio fue detectado en la exosfera de Mercurio en 1985 por Drew Potter y Tom Morgan, quienes observaron sus líneas de emisión Fraunhofer a 589 y 589,6 nm; se observó que el Sodio se concentra cerca de los polos formando puntos brillantes, su abundancia también se mejora cerca del terminador del amanecer en comparación con el terminador del anochecer, investigaciones afirmaron una correlación de la abundancia de Sodio con ciertas características de la superficie como los puntos brillantes en los radios de la Cuenca Caloris; un año después del descubrimiento del Sodio, Potter y Morgan informaron que el Potasio también está presente en la exosfera de Mercurio, aunque con una densidad menor que la del Sodio.

Las propiedades y la distribución espacial de estos dos elementos son, por lo demás, muy similares, en 1998 se detectó otro elemento, el Calcio, con una densidad de columna tres órdenes de magnitud inferior a la del Sodio, observaciones de la sonda Messenger en 2009 mostraron que el Calcio se concentra principalmente cerca del ecuador, opuesto a lo que se observa para el Sodio y el Potasio; otras observaciones de la nave Messenger enviadas en 2014 señalaron que la atmósfera se complementa con materiales vaporizados de la superficie por meteoros, tanto esporádicos como en una lluvia de meteoros asociada con el cometa Encke.



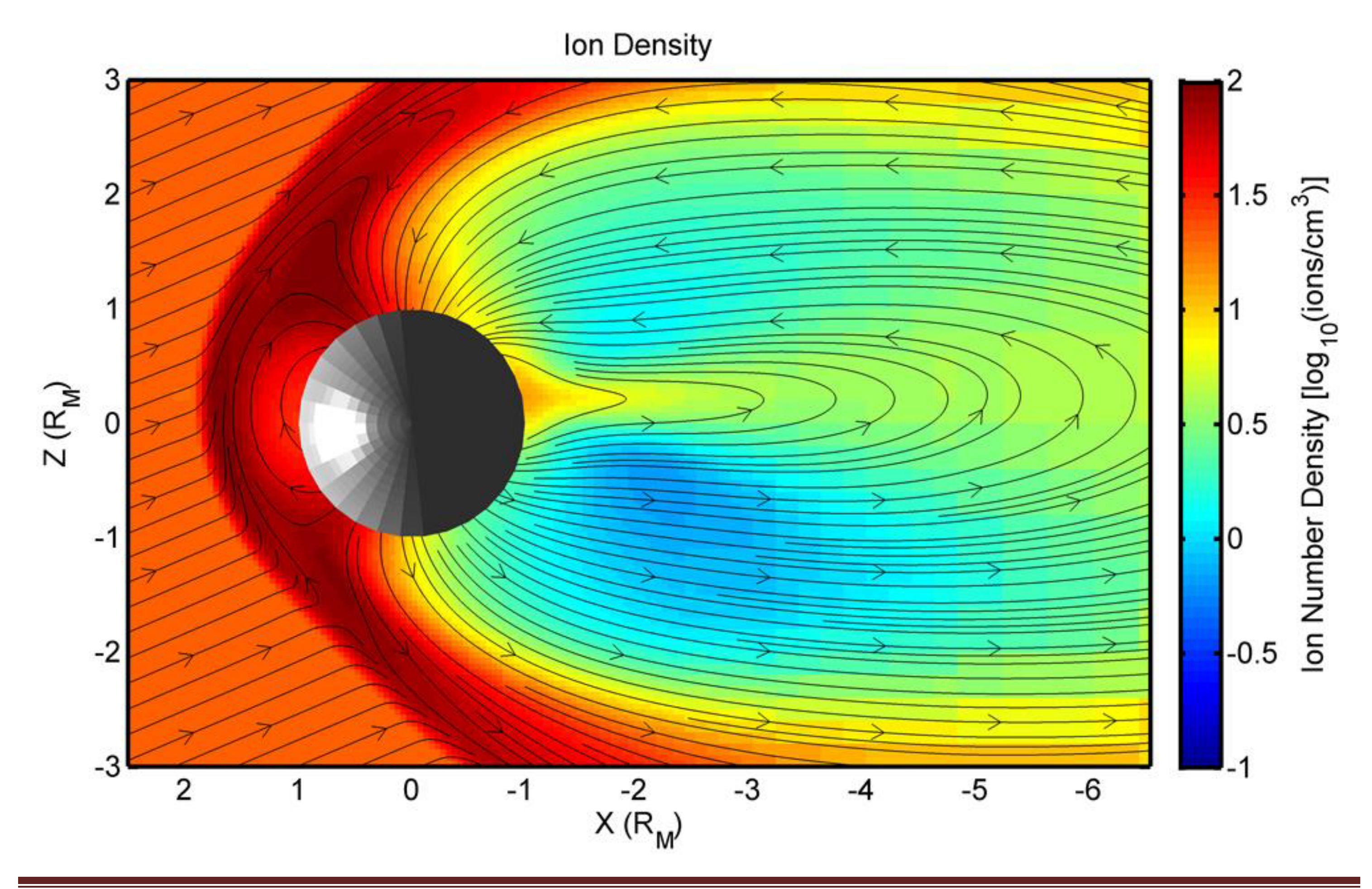


En 2008, el Espectrómetro de Plasma de Imágenes Rápidas (FIPS) de la sonda Messenger descubrió varios iones moleculares y diferentes en las proximidades de Mercurio, incluido vapor de agua ionizado y sulfuro de Hidrógeno ionizado, su abundancia en relación con el Sodio es de aproximadamente 0,2 y 0,7 respectivamente, también están presentes otros iones como hidronio, hidroxilo y Silicio, encontrados durante su sobrevuelo de 2009.

El canal del espectrómetro UV y visible (UVVS) del Espectrómetro de Composición de Superficie y Atmósfera de Mercurio (MASCS) de la sonda Messenger reveló por primera vez la presencia de Magnesio en la exosfera del planeta, la abundancia cerca de la superficie de este componente recién detectado es comparable a la del Sodio, observaciones UV de la sonda Mariner-10 establecieron un límite superior en la densidad de superficie exosférica en alrededor de 10^{5} partículas/cm^{3}, que corresponde a una presión superficial de menos de 10^{14} bares.

La temperatura de la exosfera de Mercurio depende de los químicos y la ubicación geográfica, para el Hidrógeno atómico exosferico la temperatura parece ser de unos 420 °C, un valor obtenido tanto por Mariner-10 como por la nave Messenger, la temperatura del Sodio es mucho más alta, alcanzando 750/1500 °C en el ecuador y 1500/3500 °C en los polos, algunas observaciones muestran que Mercurio está rodeado por una corona caliente de átomos de Calcio con una temperatura entre 12000 y 20000 °C.

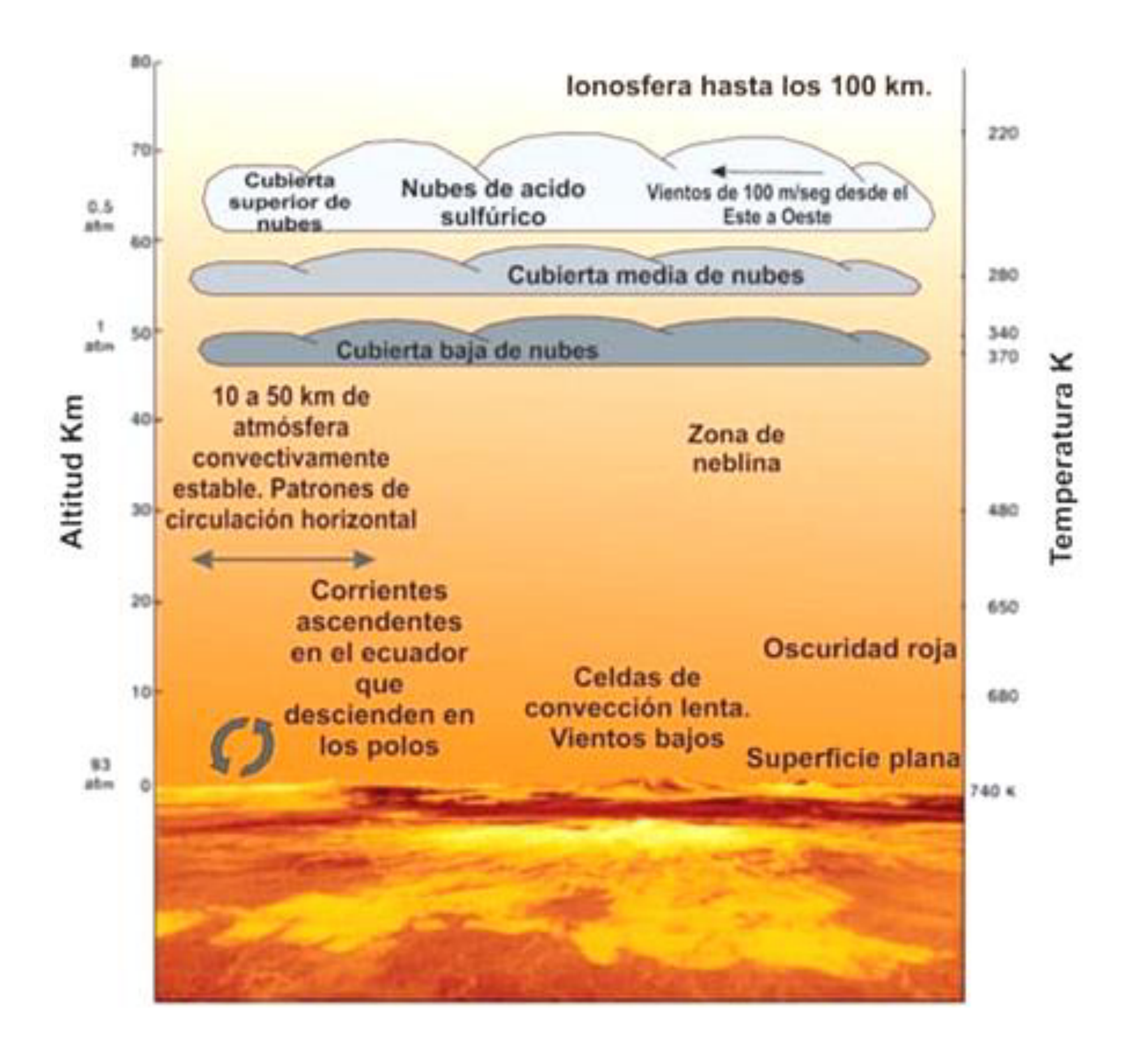
Debido a la proximidad de Mercurio al Sol, la presión de la luz solar es mucho más fuerte en la exosfera que cerca de la superficie, la radiación solar empuja a los átomos neutros lejos de Mercurio, creando una cola similar a un cometa detrás de él, el componente principal de la cola es el Sodio, que se ha detectado a más de 24 millones de Km del planeta, esta cola se expande rápidamente a un diámetro de unos 20000 Km a una distancia de 17500 Km; la sonda Messenger, en 2009, también detectó en esta cola Calcio y Magnesio.



Atmósfera de Venus

La atmósfera de Venus está compuesta por un 96,5% de dióxido de Carbono; 3,5% de Nitrógeno y trazas de otros gases, sobre todo dióxido de Azufre, la cantidad de Nitrógeno en la atmósfera es relativamente pequeña, contiene una variedad de compuestos en pequeñas cantidades, incluidos algunos basados en Hidrógeno, como el cloruro de Hidrógeno y fluoruro de Hidrógeno, también monóxido de Carbono, vapor de agua y Oxígeno atómico, el Hidrógeno es relativamente escaso en la atmósfera venusina, se teoriza que una gran cantidad de Hidrógeno del planeta se perdió en el espacio, y el resto se encuentra principalmente ligado al ácido sulfúrico.

En 2020, se anunció que se había detectado fosfina, un biomarcador potencial que indica la presencia de vida, en la atmósfera, ninguna fuente abiótica conocida presente en Venus podría producir fosfina en las cantidades detectadas, un nuevo análisis de datos de la sonda Pioneer Venus encontró que parte del Cloro y las características espectrales del sulfuro de Hidrógeno estaban relacionadas con la fosfina; a finales de 2020, una revisión de los datos utilizados en la publicación original reveló un error de interpolación que resultó en múltiples líneas falsas, incluida la característica espectral de la fosfina.



Rayos cósmicos

Durante el vuelo en la ruta Tierra-Venus, las sondas soviéticas Venera-5 y Venera-6 realizaron mediciones de rayos cósmicos solares y galácticos, estudios de plasma interplanetario y radiación solar UV dispersa, los equipos instalados en los compartimentos orbitales de las estaciones de medición de rayos cósmicos permitieron detectar protones con energías de 1 a 12 mil millones de electronvoltios (eV), así como protones con energías superiores a 30 millones de eV y electrones con energías superiores a 0,1 millones de eV; como mostraron las mediciones realizadas por las sondas Venera-5 y Venera-6, el nivel total del flujo de rayos cósmicos galácticos se volvió más bajo que en junio-octubre de 1967 durante el vuelo de la nave Venera-4, en aproximadamente un 15 % y en un 40 % en comparación con los datos obtenidos por las naves Zond-3 y Venera-2 en diciembre de 1965 (esto se debe a la actividad cíclica del Sol e indica un mayor flujo de campos magnéticos no uniformes provenientes del Sol). también, durante el vuelo de las Venera-5 y Venera-6, se registró un gran aumento en la intensidad de los flujos de protones solares con una energía de 1-4 millones de eV, 12 de ellos significativos, cuatro aumentos de intensidad se distinguieron por su estructura compleja y larga duración: cada uno de ellos duró al menos 7 días, la intensidad de los flujos superó muchas veces el nivel del fondo galáctico (esto puede explicarse por el aumento de la actividad del Sol, que se expresó en la aparición de un grupo de erupciones cromosféricas de gran fuerza ocurridas durante este período).

Flujos de plasma y radiación UV

En las proximidades de Venus, se obtuvieron datos sobre la estructura de los flujos de plasma circunplanetario; anteriormente, durante los vuelos de naves espaciales, se descubrió que el espacio interplanetario está lleno de flujos de plasma con velocidades equivalentes a varios cientos de Km/s; debido al hecho de que los flujos de plasma se alejan del Sol, se les llama viento solar; este plasma está magnetizado, y lleva consigo un campo magnético; por primera vez, en 1967 se observaron cambios bruscos en la densidad del plasma asociados con un cambio simultáneo en la fuerza del campo magnético en las cercanías de Venus utilizando una trampa de partículas cargadas y un magnetómetro instalado en la sonda Venera-4; también las naves Venera-5 y Venera-6 registraron corrientes de plasma interplanetario, a medida que las sondas se acercaban al planeta, se registraron cambios en los flujos y valores de plasma, que son característicos de la zona donde el viento solar fluye alrededor de Venus (en este caso, el frente, donde ocurrieron los cambios en los flujos de plasma, se observó a una distancia de aproximadamente 28000 Km de la superficie del planeta), y la sonda Venera-4 cruzó este frente a una distancia de 19000 Km de la superficie del planeta, esto se explica por el hecho de que las sondas Venera-5, Venera-6, así como también Venera-4, descendieron al lado nocturno del planeta, pero más lejos del terminador (el límite del día y la noche), y por lo que el cruce del cambio abrupto frente al flujo de partículas cargadas ocurría a mayor distancia del planeta.

Los fotómetros fotoeléctricos para medir la radiación UV dispersa en las cercanías del planeta y en el medio interplanetario, instalados en ambas sondas, demostraron que, como también se observó durante el vuelo de la nave Venera-4, la intensidad de la radiación en la línea del Hidrógeno atómico aumentaba al acercarse al planeta; sobre la base de los resultados de las mediciones, se calculó la densidad del Hidrógeno atómico en regiones remotas del espacio circunplanetario.

Resultó que los primeros signos de la presencia de una corona de Hidrógeno aparecieron a una distancia de 25000 Km del centro del planeta; a una distancia de unos 10000 Km, la densidad de la corona de Hidrógeno resultó ser de unos 100 átomos/cm^3.

La tarea principal de las sondas Venera-5 y Venera-6 era continuar la investigación sobre la composición química y los parámetros de la atmósfera de Venus (iniciada por primera vez por la sonda Venera-4 en 1967), para fueron equipadas con sistemas de sensores de presión y temperatura diseñados para diferentes rangos de medida, analizadores de gases para el estudio de la composición atmosférica; un densímetro para medir la densidad de la atmósfera y fotocélulas para la medición de la iluminación en la atmósfera de Venus.



Los analizadores de gases midieron el contenido de dióxido de Carbono, Oxígeno, H_2O y Nitrógeno, junto con gases inertes, en dos niveles diferentes sobre la superficie del planeta, a diferentes presiones y temperaturas; el análisis de la composición atmosférica se llevó a cabo de acuerdo con los comandos dados desde el dispositivo de tiempo de programa a bordo; de los numerosos métodos posibles para determinar la composición atmosférica, se utilizaron los métodos fisicoquímicos más simples y confiables basados en reacciones bien estudiadas con alta selectividad, el sistema de sensores para medir la temperatura y la presión consistió en termómetros de resistencia y manómetros de tipo aneroide.

La superposición mutua de los rangos de medición de los instrumentos proporcionó la posibilidad de monitorear la exactitud de las mediciones y su alta confiabilidad, para medir la densidad de la atmósfera, se utilizó un dispositivo de diapasón, cuyo principio de funcionamiento se basaba en cambiar la amplitud de las oscilaciones de cierta frecuencia según la densidad del medio ambiente; para medir la cantidad de iluminación en la atmósfera, se utilizaron sensores fotoeléctricos, diseñados para detectar radiación en las regiones visible e IR cercano del espectro con un umbral de sensibilidad de 0,5 W/m^2 (este valor de iluminación corresponde aproximadamente a la iluminación de la Tierra en el crepúsculo profundo).

Se instalaron radioaltímetros decímetros en los vehículos de descenso, el principio de su funcionamiento era similar al de los altímetros de aviación, y se determinaron unos valores fijos de las distancias a la superficie del planeta durante el descenso, el rango de escalas de altitud fijas que podían registrar los radioaltímetros estaba en los 50 a 10 Km (esta elección del rango operativo del instrumento se justificó por los datos obtenidos por la sonda Venera-4 y cálculos preliminares de tiempo y altura de apertura del paracaídas, todas las mediciones científicas se realizaron en el momento del descenso en paracaídas de las estaciones).

El primer muestreo de la atmósfera para su análisis en la sonda Venera-5 se realizó poco después de la apertura del paracaídas principal, cuando la presión era de unas 0,6 atm y la temperatura de unos 25 °C, luego se tomó la muestra a una altitud más baja, cuando la presión era de unas 5 atm y la temperatura de unos 150 °C; el analizador de gases de la sonda Venera-6 también tomó una muestra de la composición atmosférica de Venus dos veces a diferentes alturas, la primera muestra se tomó a una presión de aproximadamente 1 atm, cuando la temperatura era de aproximadamente 60 °C, luego cuando la presión alcanzó las 10 atm y la temperatura era de 225 °C.

Los resultados de las sondas Venera-5 y Venera-6, confirmaron y refinaron los datos obtenidos anteriormente por la sonda Venera-4; se descubrió que la atmósfera de Venus está compuesta casi en su totalidad por dióxido de Carbono y contiene pequeñas cantidades de Nitrógeno, H_2O y Oxígeno, la concentración de dióxido de Carbono alcanza el 93-97 % (en Venera-4, se obtuvo un valor de 90 ±10 %), el Nitrógeno, junto con los gases inertes, es del 2-5 %, y el Oxígeno no supera el 0,4 %.

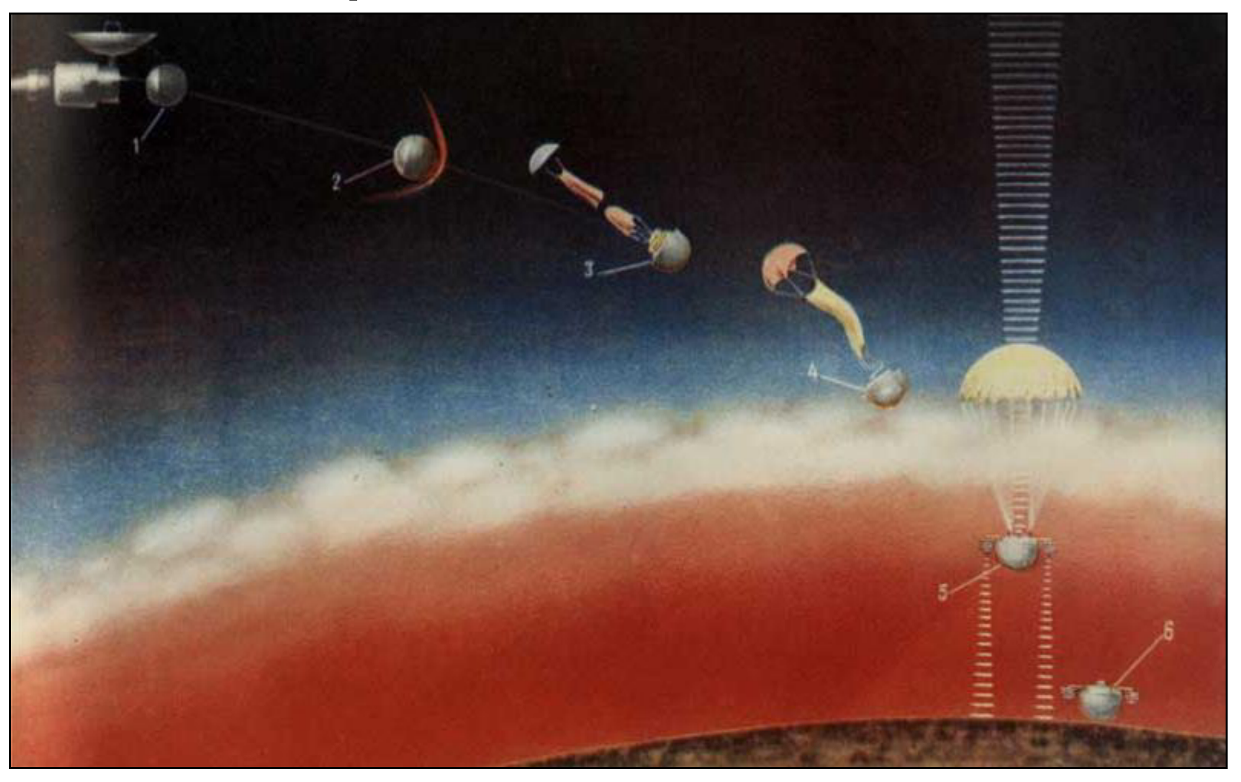
El contenido de vapor de H_2O en altitudes correspondientes a una presión de 0,6 atm es de 1 a 8 mg/lt, medición realizada en 1967 por la sonda Venera-4, indicando que la atmósfera de Venus no está saturada de vapor de H_2O en las alturas donde se realizaron las mediciones.

Venera-5 y Venera-6 realizaron sondeos de la atmósfera en áreas donde la temperatura variaba aproximadamente de 25 a 320°C, y la presión de 0,5 a 27 atm; con base en los resultados de las mediciones de temperatura, presión y composición química, se calcularon los segmentos de descenso de vehículos en la atmósfera de Venus, en los que se midieron los parámetros atmosféricos desde los momentos de apertura de los paracaídas principales, para la sonda Venera-5 este tramo fue de 36 Km y para Venera-6 de 38 Km.

La diferencia de valores de altitud registrados por los radioaltímetros al inicio y final del descenso coincidió satisfactoriamente con los tramos de trayectoria recorridos por las sondas durante el descenso en paracaídas, los tramos de descenso se calcularon en base a la condición de equilibrio hidrostático de la atmósfera según los valores medidos de temperatura y presión en los puntos temporales correspondientes a las marcas de altitud obtenidas, así como utilizando las características aerodinámicas de las sondas durante descenso en paracaídas.

Las sondas Venera-5 y Venera-6 completaron sus tareas y transmitieron a la Tierra datos de capas más profundas de la atmósfera que Venera-4, permitieron, a través de mediciones directas, refinar la composición química de la atmósfera del planeta y obtener valores confiables de temperatura, presión y densidad de su atmósfera en el rango de altitud de unos 40 Km.

Los resultados de los experimentos confirmaron una vez más que Venus tiene una atmósfera poderosa y densa, que consiste principalmente en dióxido de Carbono, y tiene una presión y temperaturas muy altas cerca de la superficie; los sensores fotoeléctricos instalados en las estaciones no registraron la iluminación de la atmósfera de Venus en el lado nocturno por encima del valor umbral de 0,5 W/m^2 (la excepción es una indicación observada por la sonda Venera-5, correspondiente a un nivel de alrededor de 25 W/m^2, que ocurrió a alrededor de 4 min. antes de la finalización de la comunicación por radio).





Troposfera

La parte más densa de la atmósfera venusina, la troposfera, comienza en la superficie y se extiende hasta los 65 Km; en la superficie, los vientos son lentos, pero en la parte superior de la troposfera la temperatura y la presión alcanzan niveles similares a los terrestres, y las nubes alcanzan una velocidad de 360 Km/h, la presión atmosférica en la superficie es similar a la presión que se encuentra a 900 m bajo el mar en la Tierra, contiene el 99 % de la atmósfera en masa, el 90 % de la atmósfera de Venus se encuentra a 28 Km de altura; a los 50 Km, la presión atmosférica es aproximadamente igual a la de la superficie terrestre, en el lado nocturno de Venus se pueden encontrar nubes a 80 Km de altura.

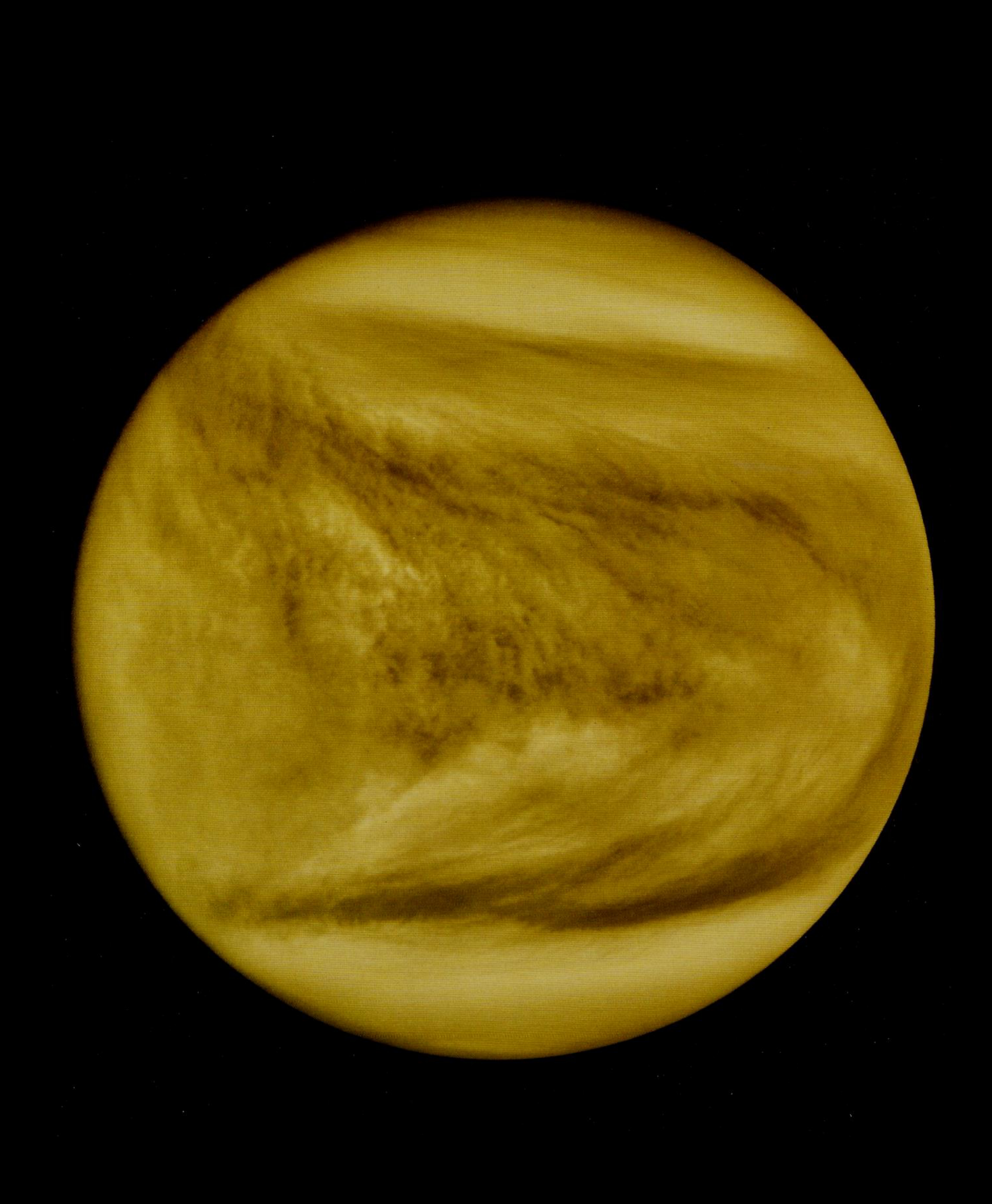
La densidad del aire en la superficie es de 67 Kg/m^3, la presión que se encuentra en la superficie es lo suficientemente alta como para que el dióxido de Carbono ya no sea un gas, sino un fluido supercrítico que forma una especie de mar que cubre toda la superficie y transfiere calor de manera muy eficiente, amortiguando los cambios de temperatura entre la noche y el día (56 días terrestres).

La gran cantidad de dióxido de Carbono en la atmósfera junto con el vapor de H_2O y el dióxido de Azufre crean un fuerte efecto invernadero, atrapando la energía solar y elevando la temperatura de la superficie a alrededor de 467 °C, más caliente que cualquier otro planeta en el Sistema Solar (incluso Mercurio) a pesar de estar ubicado más lejos del Sol y recibir solo el 25% de la energía solar que Mercurio recibe, la temperatura promedio en la superficie es entre los 327-420 °C, la troposfera gruesa también hace que la diferencia de temperatura entre el lado del día y la noche sea pequeña, a pesar de que la lenta rotación retrógrada del planeta hace que un solo día solar dure 116,5 días terrestres.

La altitud de la troposfera más similar a la de la Tierra está cerca de la tropopausa, el límite entre la troposfera y la mesosfera, se encuentra un poco por encima de los 50 Km, según recientes mediciones de las naves Magallanes y Venus Express, a una altura de 52,5 a 54 Km tiene una temperatura entre 20 °C y 37 °C; a 49,5 Km sobre la superficie es donde la presión llega a ser la misma que la de la Tierra al nivel del mar, las velocidades del viento están determinadas por el equilibrio del gradiente de presión y las fuerzas centrífugas en un flujo casi puramente zonal, se pueden medir directamente solo en la troposfera superior (tropopausa) entre 60 y 70 Km de altitud, que corresponde a la capa superior de nubes.

El movimiento de las nubes generalmente se observa en la parte UV del espectro, donde el contraste entre las nubes es mayor, las velocidades lineales del viento a este nivel son aproximadamente 360 Km/h en una latitud inferior a 50°, son retrógrados en el sentido de que soplan en la dirección de la rotación retrógrada del planeta, los vientos disminuyen rápidamente hacia las latitudes más altas, llegando finalmente a 0 en los polos; vientos tan fuertes en la cima de las nubes provocan un fenómeno conocido como superrotación atmosférica, estos vientos rodean todo el planeta más rápido de lo que gira el planeta mismo, la superrotación en Venus es diferencial, la troposfera ecuatorial gira más lentamente que en las latitudes medias, también tienen un fuerte gradiente vertical y disminuyen en las profundidades de la troposfera a una velocidad de 10 Km/h; los vientos cerca de la superficie, se mueven a menos de 7 Km/h, pero debido a la alta densidad de la atmósfera en la superficie, todavía es suficiente para transportar polvo y piedras pequeñas.

Entre 50 y 54 Km sobre la superficie sería la altitud adecuada para basar una exploración humana, donde la temperatura sería en el rango crucial de agua líquida de 0 a 50 °C y la presión del aire es la misma que en las regiones habitables terrestres, como el dióxido de Carbono es más pesado que el aire, una nave tipo dirigible cuyo interior tenga Nitrógeno y Oxígeno podría mantener su estructura flotando.



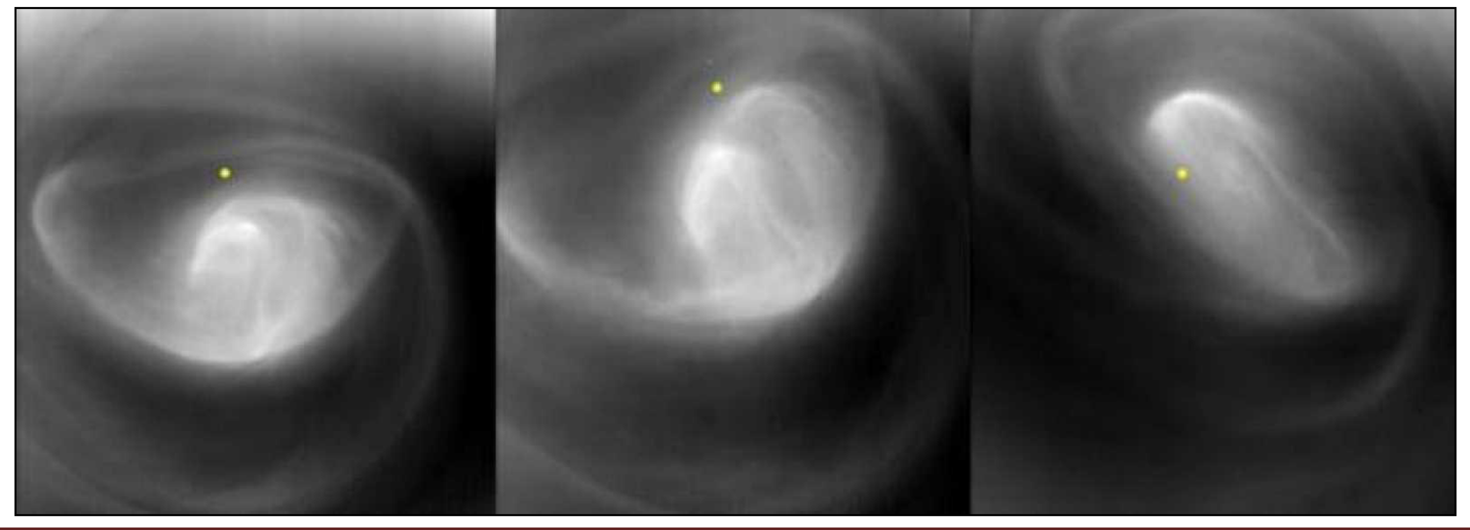
Vientos

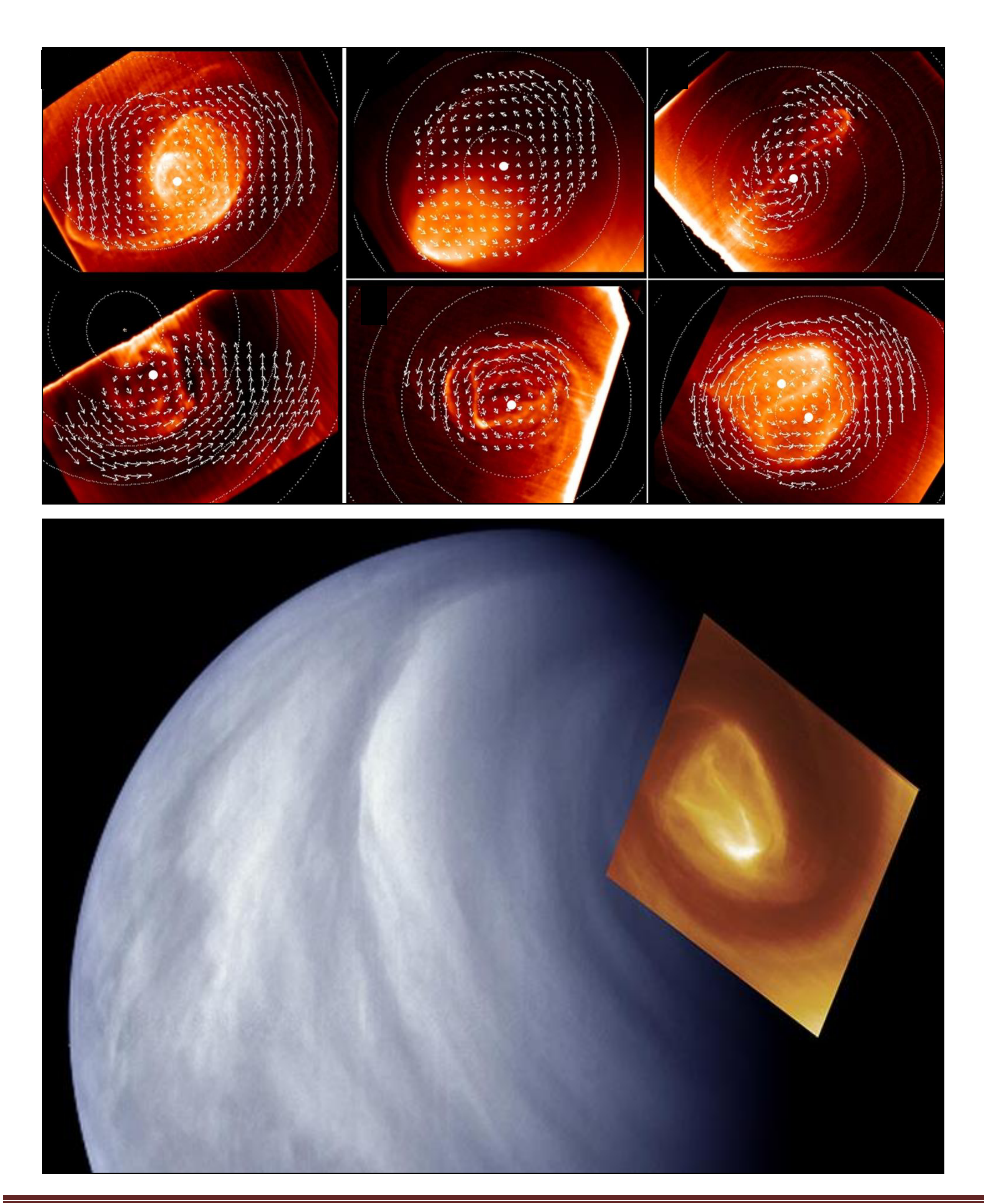
Los vientos en Venus son impulsados finalmente por convección, el aire caliente se eleva en la zona ecuatorial, donde se concentra el calor solar y fluye hacia los polos; este vuelco casi planetario de la troposfera se denomina circulación de Hadley. Sin embargo, los movimientos del aire meridional son mucho más lentos que los vientos zonales.

El límite hacia los polos de la circulación de Hadley en todo el planeta está cerca de latitudes de ±60°, aquí el aire comienza a descender y regresa al ecuador debajo de las nubes (esta interpretación está respaldada por la distribución del monóxido de Carbono, que también se concentra en las latitudes de ±60°), hacia el polo de la circulación de Hadley se observa un patrón de circulación diferente, en el rango de latitud 60°/-70° existen collares polares fríos, se caracterizan por temperaturas entre -1 y -2 °C más bajas que en la troposfera superior en latitudes cercanas; la temperatura más baja probablemente sea causada por la afluencia de aire en ellos y por el enfriamiento adiabático resultante, respaldada por las nubes más densas y altas en los collares; las nubes se encuentran a una altitud de 70/72 Km en los collares (5 Km más alto que en los polos y las latitudes bajas).

Dentro de los collares polares se encuentran extrañas estructuras conocidas como vórtices polares, anticiclones con surgencia en el centro y en los collares polares fríos (tormentas similares a huracanes terrestres) cada vórtice tiene dos centros de rotación, que están conectados por distintas estructuras de nubes en forma de S, estas estructuras de doble ojo también se denominan dipolos polares; los vórtices giran con un período de 3 días en la dirección de la superrotación atmosférica, las velocidades del viento son de 120 a 180 Km/h cerca de sus bordes exteriores y 0 en los polos, la temperatura en la cima de las nubes en cada vórtice polar es mucho más alta que en los collares polares cercanos, alcanzando los -23 °C.

Observaciones en IR indicaron que la circulación anticiclónica observada cerca de los polos llega hasta los 50 Km de profundidad (base de las nubes), la troposfera superior polar y la mesosfera son extremadamente dinámicas por lo que pueden aparecer y desaparecer grandes nubes brillantes en el espacio de unas pocas horas, uno de estos eventos fue observado por la sonda Venus Express entre el 9 y 13-01-2007, cuando la región del polo S se volvió más brillante en un 30% (evento probablemente causado por una inyección de dióxido de Azufre en la mesosfera, que luego se condensó, formando una neblina brillante) el primer vórtice fue descubierto en el polo N por la sonda Pioneer Venus en 1978; otro gran vórtice de doble centro en el polo S fue descubierto en 2006 por la nave Venus Express, la sonda Akatsuki reveló algo similar a los vientos en chorro en la región de nubes bajas y medias, que se extiende de 45 a 60 Km de altitud, la velocidad del viento se maximizó cerca del ecuador, en 2017, los científicos llamaron a este fenómeno chorro ecuatorial venusino.





Mesosfera

La mesosfera de Venus se puede dividir en dos capas, la inferior entre 62/73 Km y la superior entre 73/95 Km, en la primera capa, la temperatura es casi constante a -43 °C, coincide con la capa superior nubosa, en la segunda capa, la temperatura comienza a descender nuevamente, alcanzando alrededor de -108 °C a una altura de 95 Km, donde comienza la mesopausa.

Los patrones de circulación en la mesosfera superior y la termosfera de Venus son completamente diferentes a los de la mesosfera inferior, en altitudes de 90/150 Km, el aire se mueve del lado del día al lado de la noche del planeta, con surgencia sobre el hemisferio iluminado por el Sol y surgencia sobre el hemisferio oscuro.

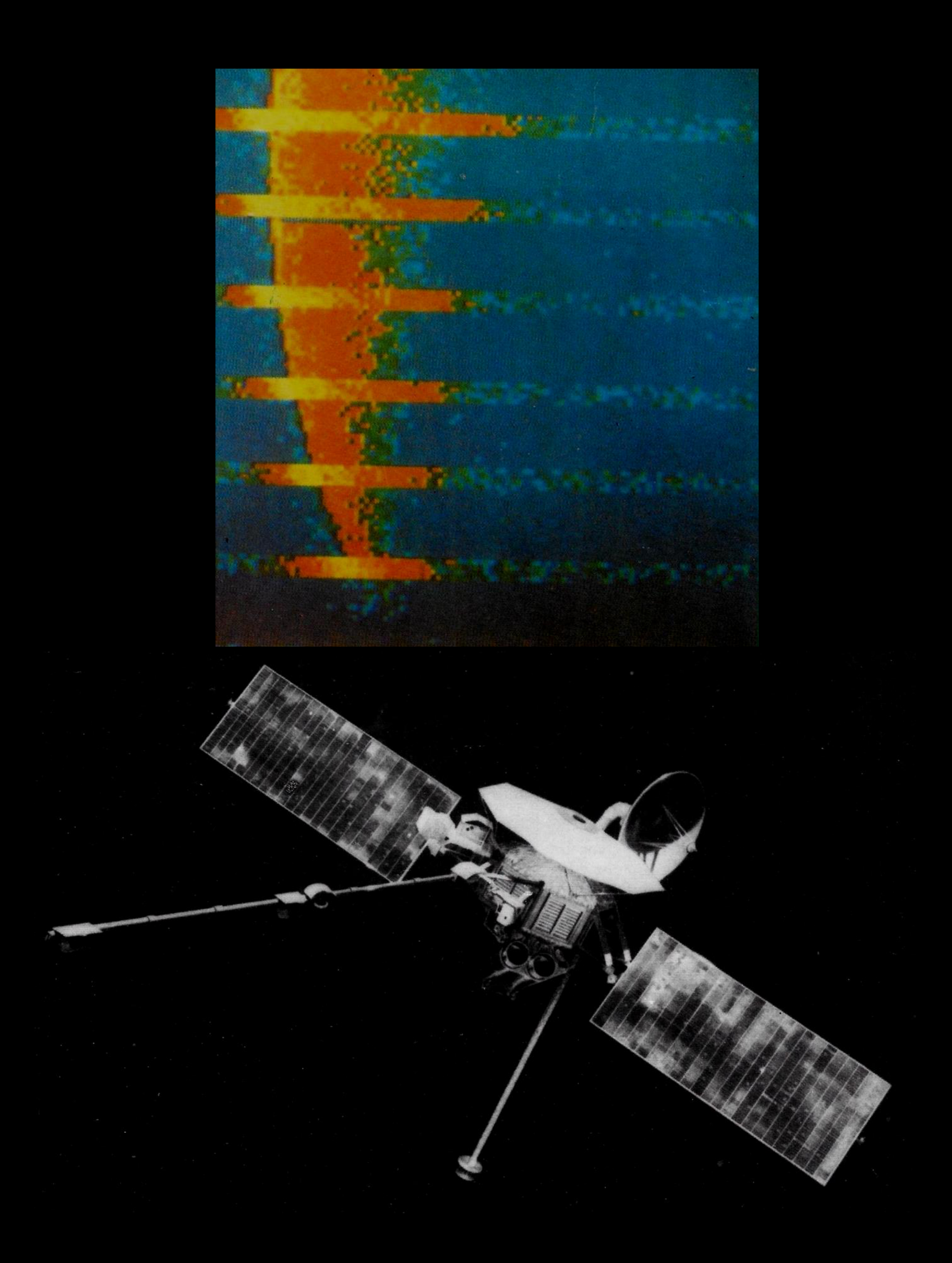
La caída sobre el lado nocturno provoca un calentamiento adiabático del aire, que forma una capa cálida en la mesosfera del lado nocturno en las altitudes de 90/120 Km, la temperatura de esta capa, -43 °C, es mucho más alta que la temperatura típica que se encuentra en la termosfera nocturna, -173 °C, el aire que circula desde el lado del día también transporta átomos de Oxígeno, que después de la recombinación forman moléculas excitadas de Oxígeno, que luego se relajan y emiten radiación IR en longitud de onda de 1,27 µm, la mesosfera superior del lado nocturno y la termosfera son también fuente de emisiones de equilibrio termodinámico no local de moléculas de dióxido de Carbono y óxido nítrico, responsables de la baja temperatura de la termosfera del lado nocturno.

La sonda Venus Express demostró a través de la ocultación estelar que la neblina atmosférica se extiende mucho más arriba en el lado nocturno que en el lado diurno; en el lado diurno, la capa de nubes tiene un grosor de 20 Km y se extiende hasta unos 65 Km, mientras que en el lado nocturno la capa de nubes en forma de neblina espesa alcanza hasta 90 Km de altura, continuando incluso más allá de los 105 Km como una neblina más transparente, en 2011, la sonda Venus Express descubrió que Venus tiene una fina capa de ozono a una altitud de 100 Km.



Mesopausa

Es la parte más fría de la atmósfera del lado diurno de Venus, sirve como límite entre la mesosfera y la termosfera y se encuentra entre 95/120 Km, la temperatura aumenta a un valor constante, alrededor de 27/127 °C, prevalente en la termosfera, la termosfera venusina del lado nocturno es el lugar más frío con temperaturas tan bajas como -173 °C (incluso se la denomina criosfera).



Magnetosfera inducida

Venus no tiene campo magnético, la razón de su ausencia no está del todo clara, pero puede estar relacionada con una menor intensidad de convección en el manto venusino, Venus solo tiene una magnetosfera inducida que está formada por el campo magnético del Sol transportado por el viento solar, esta magnetosfera inducida tiene un arco de choque, una magnetopausa y una cola magnética.

En el punto subsolar, el arco de choque se encuentra a 1900 Km sobre la superficie de Venus, distancia que se midió en 2007 cerca del mínimo de actividad solar; cerca del máximo de actividad solar, puede estar varias veces más lejos del planeta; la magnetopausa se encuentra a una altura de 300 Km; entre la magnetopausa y la ionopausa existe una barrera magnética, una mejora local del campo magnético que evita que el plasma solar penetre más profundamente en la atmósfera de Venus, al menos cerca de la actividad mínima solar el campo magnético en la barrera alcanza hasta 40 nanoTesla (nT).

La cola magnética continúa hasta los 10 radios del planeta, es la parte más activa de la magnetosfera de Venus, en este lugar existen eventos de reconexión y aceleración de partículas, las energías de electrones e iones en la cola magnética son de alrededor de 100 y 1000 electrón Volt (eV) respectivamente.

Debido a la falta del campo magnético intrínseco en Venus, el viento solar penetra relativamente profundamente en la exosfera planetaria y causa una pérdida sustancial de atmósfera, la pérdida ocurre principalmente a través de la cola magnética (actualmente, los principales tipos de iones que se pierden son O^+, H^+ y He^+, la relación de pérdidas de Hidrógeno a Oxígeno es de alrededor de 2 (casi estequiométrica), lo que indica la pérdida de agua en curso.

Ionosfera

Ubicada en altitudes de 120/300 Km, la ionosfera casi coincide con la termosfera, los altos niveles de ionización se mantienen solo durante el lado diurno del planeta, en el lado nocturno, la concentración de electrones es casi nula, consta de tres capas, la capa V-1 entre 120/130 Km; la capa V-2 entre 140/160 Km y la capa V-3 entre 200/250 Km (puede haber una capa adicional cerca de 180 Km) la máxima densidad de volumen de electrones (número de electrones en una unidad de volumen) se alcanza en la capa V-2 cerca del punto subsolar.

El límite superior de la ionosfera (ionopausa) se encuentra a 220/375 Km de altura y separa el plasma del origen planetario del de la magnetosfera inducida, la principal especie iónica en las capas V-1 y V-2 es el ión O_2^+; la capa V-3 consta de iones O^+, el plasma ionosférico está en movimiento; la fotoionización solar en el lado diurno y la recombinación de iones en el lado nocturno son los procesos principales responsables de la aceleración del plasma, el flujo de plasma parece ser suficiente para mantener la ionosfera del lado nocturno en o cerca del nivel medio de densidades iónicas.

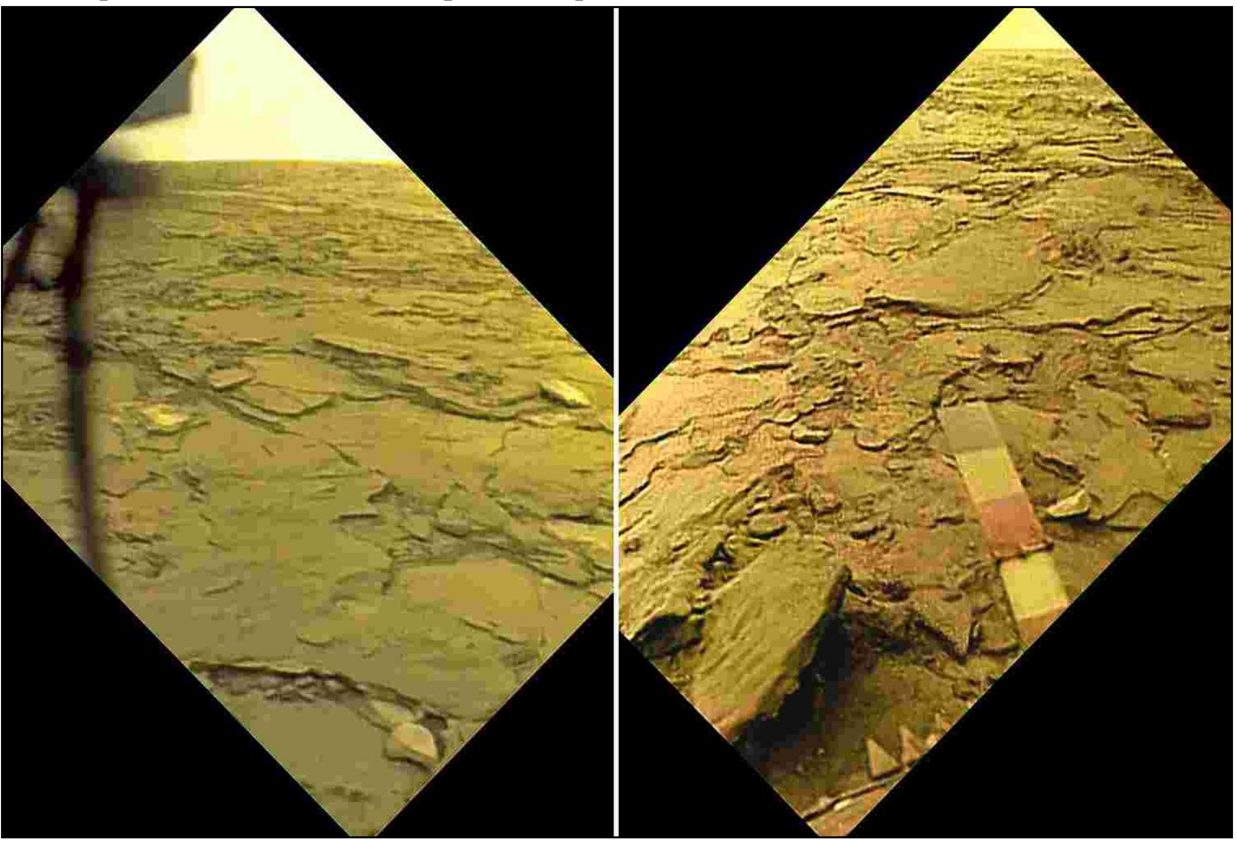
Nubes

Compuestas principalmente de un 96% de gotas de ácido sulfúrico, estas nubes oscurecen la superficie de Venus de las imágenes ópticas y reflejan aproximadamente el 75% de la luz solar que cae sobre ellas, la densidad de las nubes es muy variable con la capa más densa a unos 48 Km, alcanzando 0,1 g/m^3 (similar a la gama más baja de nubes de tormenta cumulonimbos en la Tierra).

La capa de nubes es tal que los niveles de luz superficial típicos son similares a los de un día parcialmente nublado en la Tierra (5000/10000 lux), la visibilidad equivalente es de unos 3 Km, pero probablemente varía según las condiciones del viento, a pesar de su proximidad al Sol, debido a la espesa capa de nubes altamente reflectante, la energía solar total recibida por la superficie del planeta es menor que la de la Tierra.

El ácido sulfúrico se produce en la atmósfera superior por la acción fotoquímica del Sol sobre el dióxido de Carbono, el dióxido de Azufre y el vapor de H_2O, los fotones UV de longitudes de onda inferiores a 169 nm pueden fotodisociar el dióxido de Carbono en monóxido de Carbono y Oxígeno monoatómico, el Oxígeno mono atómico es muy reactivo; cuando reacciona con el dióxido de Azufre, el resultado es trióxido de Azufre, que puede combinarse con el vapor de H_2O para producir ácido sulfúrico.

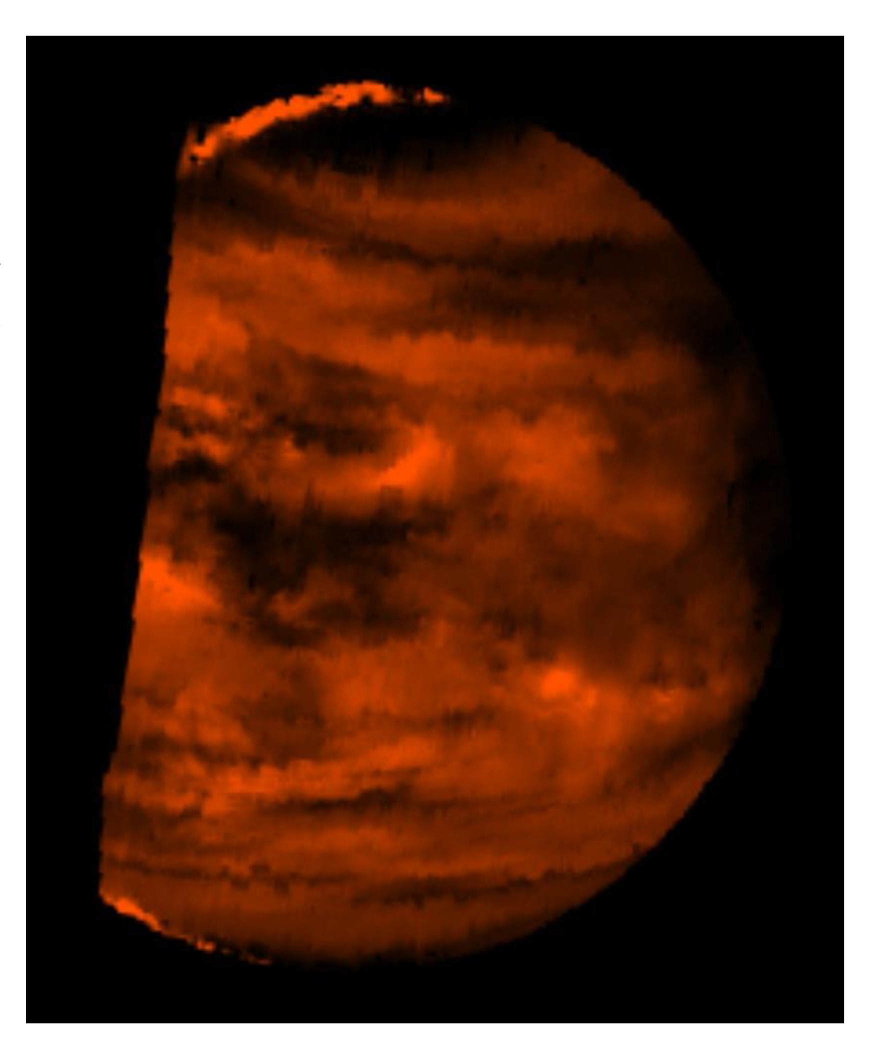
La humedad del nivel de la superficie es inferior al 0,1% la lluvia de ácido sulfúrico de Venus nunca llega al suelo porque es evaporada por el calor antes de llegar a la superficie, se teoriza que la actividad volcánica temprana liberó Azufre a la atmósfera y las altas temperaturas evitaron que quedara atrapado en compuestos sólidos en la superficie como lo estaba en la Tierra, además del ácido sulfúrico, las gotas de las nubes pueden contener una amplia gama de sales de sulfato, elevando el pH de la gota; en 2009, un astrónomo observó un punto brillante prominente en la atmósfera y fue fotografiado por la sonda Venus Express, su causa se desconoce, y el vulcanismo superficial avanza como una posible explicación.



Rayos

Las nubes de Venus pueden ser capaces de producir relámpagos, pero el debate está en curso, con relámpagos volcánicos y sprites (también en discusión) las sondas Venera 9 y 10 obtuvieron pruebas electromagnéticas y ópticas ambiguas de rayos, la sonda Venus Express en 2007 detectó ondas que podrían atribuirse a rayos, su intermitente apariencia indicaba un patrón asociado con la actividad meteorológica, al parecer, la velocidad de los rayos es al menos la mitad de los de la Tierra, siendo incompatible con los datos de la nave Akatsuki, que indicaron una velocidad de destello muy baja; el mecanismo que genera los rayos en Venus, si está presente, sigue siendo desconocido; si bien las gotas de las nubes de ácido sulfúrico pueden cargarse, la atmósfera puede ser demasiado conductora de la electricidad para que la carga se mantenga, lo que evita los rayos.

La temperatura de la superficie de Venus (más de 450 °C) está mucho más allá del rango de extremófilos que existen en la Tierra, que se extiende solo algunos grados más allá de los 100 °C. Sin embargo, la temperatura más baja de las cimas de las nubes demuestra que sería posible la existencia de vida allí, de la misma manera que las bacterias viven y se reproducen en las nubes terrestres. Sin embargo, cualquier bacteria que viva en las cimas de las nubes debería ser del tipo hiperacidófila, debido al ambiente de ácido sulfúrico concentrado en la zona, los microbios en la atmósfera espesa y turbia podrían protegerse de la radiación solar por los compuestos de Azufre en el aire.



Las sondas Pioneer, Venera y Magallanes encontraron en la atmósfera superior sulfuro de Hidrógeno (luego discutido), y dióxido de Azufre, así como sulfuro de carbonilo, los dos primeros gases reaccionan entre sí, lo que implica que algo debe producirlos, el sulfuro de carbonilo es difícil de producir de forma inorgánica, pero está presente en la atmósfera de Venus. Sin embargo, el vulcanismo del planeta podría explicar su presencia; una de las primeras sondas Venera detectó grandes cantidades de Cloro tóxico debajo de la cubierta de nubes.

Se ha propuesto que los microbios en este nivel podrían absorber la luz UV del Sol como fuente de energía, lo que podría ser una posible explicación para el absorbente de UV desconocido visto como manchas oscuras en las imágenes UV del planeta; la existencia de este absorbente de UV desconocido, llevó al astrónomo Carl Sagan a publicar un artículo en 1963 proponiendo la hipótesis de los microorganismos en la atmósfera superior como el agente que absorbe la luz UV; en 2012, la abundancia y distribución vertical de estos absorbentes UV en la atmósfera de Venus se investigaron a partir del análisis de imágenes de la Cámara de Monitoreo de Venus (pequeña cámara con un campo de visión de 17,5° de la sonda Venus Express) pero su composición aún se desconoce; en 2016, el dióxido de disulfuro fue identificado como un posible candidato para causar la absorción de UV hasta ahora desconocida de la atmósfera de Venus, las manchas oscuras de absorbentes de UV son lo suficientemente prominentes como para influir en el clima de Venus.

En 2020, estudios realizados por los radiotelescopios James Maxwell (Hawaii) y ALMA (Chile) detectaron fosfina en la atmósfera de Venus que no estaba vinculada a ningún método abiótico conocido de producción presente, o posible en condiciones venusinas; es extremadamente difícil de hacer, y la química de las nubes venusinas deberían destruir las moléculas antes de que pudieran acumularse en las cantidades observadas.

La fosfina se detectó a alturas de al menos 50 Km sobre la superficie de Venus, y se detectó principalmente en latitudes medias (no se detectó en los polos de Venus), los científicos señalan que la detección en sí podría verificarse más allá del uso de múltiples telescopios que detecten la misma señal, ya que la huella de la fosfina descrita en el estudio podría ser teóricamente una señal falsa introducida por los telescopios o por el procesamiento de datos, posteriormente se sugirió que la detección era un falso positivo o señal verdadera con amplitud muy sobreestimada, compatible con una concentración de fosfina de 1 ppb (partes x billón).


Radiotelescopio ALMA (Chile)

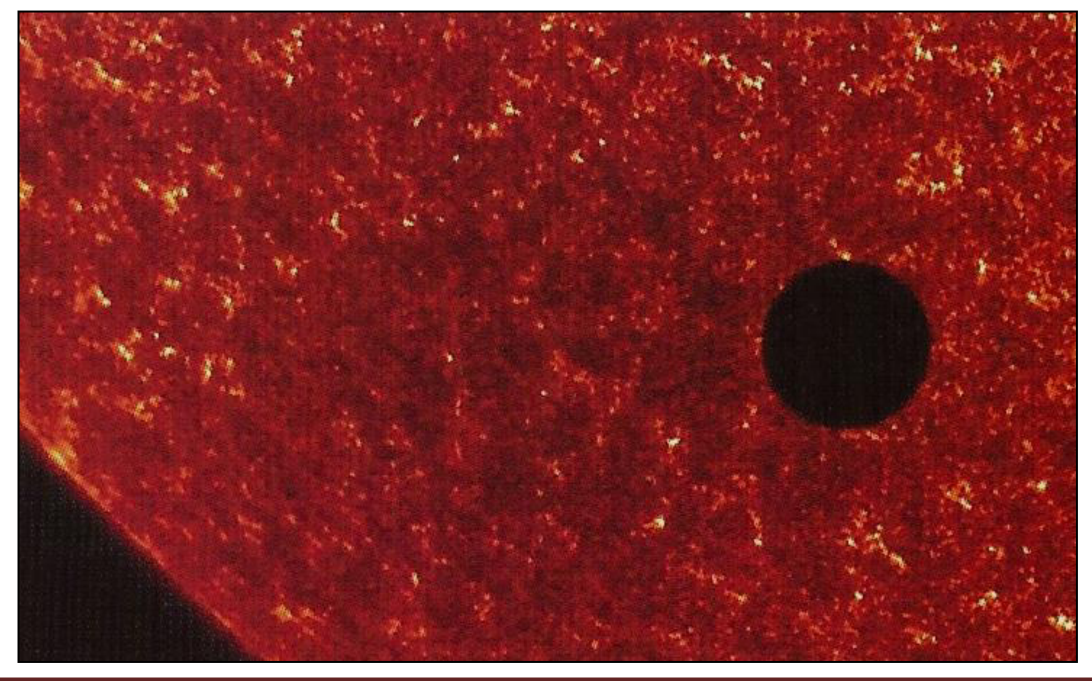

Radiotelescopio James Maxwell (Hawaii)

Mediante estudios de la estructura actual de las nubes y la geología de la superficie, combinados con el hecho de que la luminosidad del Sol ha aumentado en un 25% desde hace unos 3800 millones de años, se cree que el entorno primitivo de Venus era más parecido al de la Tierra con agua líquida en la superficie, en algún momento de la evolución del planeta, se produjo un efecto invernadero a gran escala, que condujo a la atmósfera actual dominada por el invernadero y se estima que ocurrió hace unos 4000 millones de años; el efecto invernadero desbocado puede haber sido causado por la evaporación del agua superficial y el aumento de los niveles de gases de efecto invernadero, por esta razón la atmósfera de Venus ha recibido mucha atención por parte de quienes estudian el cambio climático en la Tierra.

No hay formas geológicas en el planeta que sugieran la presencia de agua durante los últimos 1000 millones de años; la opinión común entre los científicos investigadores es que el H_2O habría existido durante unos 600 millones de años en la superficie antes de evaporarse, aunque algunos creen que hasta 2000 millones de años también podrían ser plausibles (esta escala de tiempo más larga para la persistencia de los océanos también está respaldada por simulaciones que incorporan los efectos térmicos de las nubes en una hidrosfera venusiana en evolución).

La mayoría de los científicos cree que la Tierra primitiva durante el eón Hadeano tuvo una atmósfera similar a la de Venus, con aproximadamente 100 bar de CO_2 y una temperatura superficial de 230 °C, y posiblemente incluso nubes de ácido sulfúrico, hasta hace unos 4000 millones de años, momento en el que la tectónica de placas estaba en plena vigencia y, junto con los primeros océanos de agua, eliminó el CO_2 y el Azufre de la atmósfera, es muy probable que Venus temprano hubiera tenido océanos de H_2O como la Tierra, pero cualquier placa tectónica habría terminado cuando Venus perdió sus océanos. Se estima que su superficie tiene unos 500 millones de años, por lo que no se esperaría que mostrara evidencia de tectónica de placas.

En 1761, Mikhail Lomonosov observó un arco de luz que rodeaba la parte de Venus fuera del disco del Sol al comienzo de la fase de salida del tránsito y concluyó que Venus tiene una atmósfera; en 1940, Rupert Wildt calculó que la cantidad de dióxido de Carbono en la atmósfera de Venus elevaría la temperatura superficial por encima del punto de ebullición del agua, dato confirmado cuando la sonda Mariner 2 hizo mediciones de radio de la temperatura en 1962; en 1967, la sonda Venera-4 confirmó que la atmósfera estaba compuesta sobre todo de dióxido de Carbono.



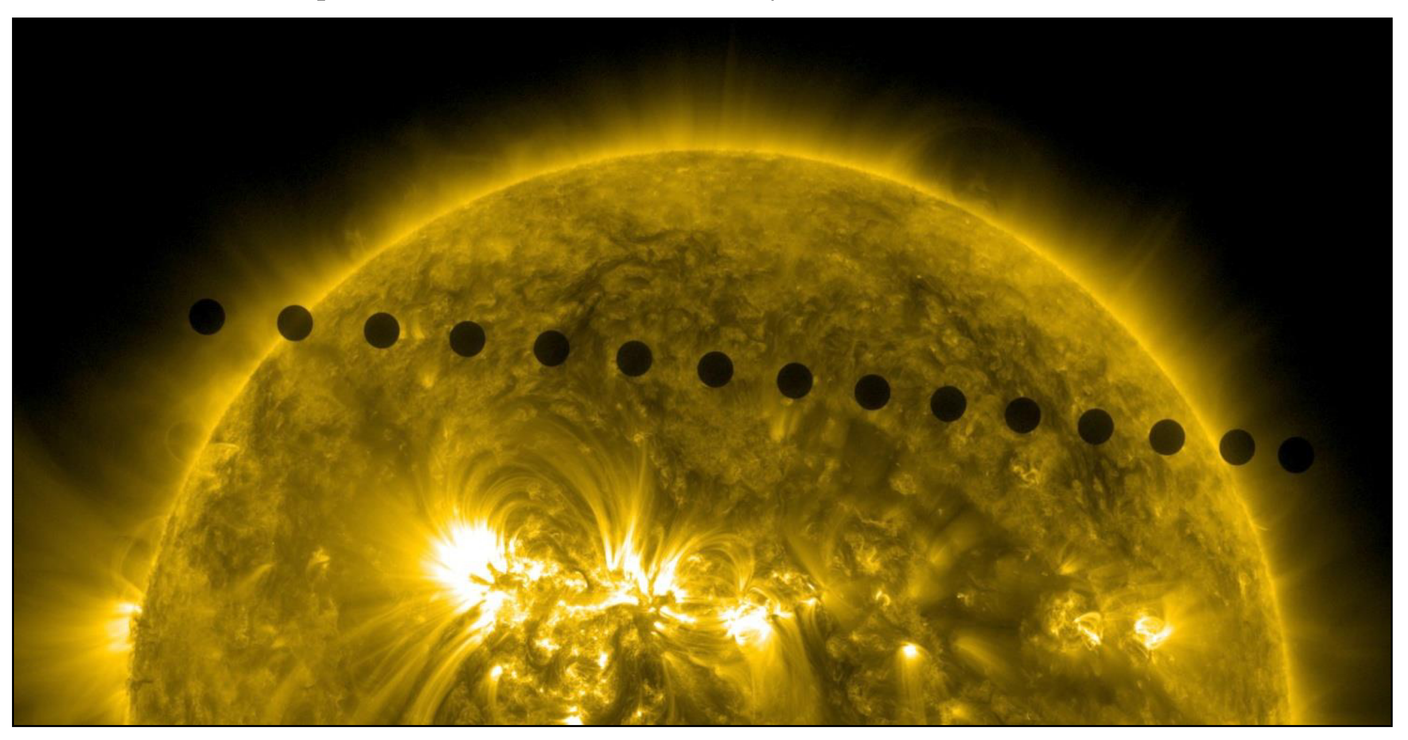


Escaneos de alta resolución vertical del limbo de Venus realizados por el fotopolarímetro de la sonda Pioneer Venus a longitudes de onda de 365 nm y 690 nm se utilizaron para investigar el nivel de la parte superior de la neblina, las propiedades de las partículas de la neblina y la altura de la escala, la profundidad óptica vertical de partículas de neblina ocurre a una altitud de 80 a 85 Km según el conocimiento de la orientación del instrumento

Las cimas de neblina más bajas se observaron cerca de las longitudes subsolares, pero el conjunto de datos respalda una dependencia de la longitud que no es más que una variación temporal; los cálculos de dispersión simple para una atmósfera de capa esférica muestran una buena concordancia con las intensidades observadas para partículas de menos de 0,3 µm de radio y un índice de refracción inferior a 1,7, en consonancia con, entre otros, el ácido sulfúrico concentrado, las regiones de presión de 5 a 2 mbar varían entre 1 y 3 Km durante la temporada (12 de 92 días), la latitud (15-45° N) y los rangos de hora local de las observaciones, a veces se presentan capas desprendidas de neblina.

La atmósfera superior de Venus se puede medir desde la Tierra cuando el planeta cruza el Sol en un evento conocido como tránsito solar usando espectroscopia astronómica cuantitativa, los científicos pudieron analizar la luz solar que pasó a través de la atmósfera del planeta para revelar los químicos dentro de ella; como la técnica para analizar la luz para descubrir información sobre la atmósfera de un planeta solo mostró resultados por primera vez en 2001, esta fue la primera oportunidad de obtener resultados concluyentes de esta manera en la atmósfera de Venus desde que comenzó la observación de los tránsitos solares.

Este tránsito solar fue una rara oportunidad considerando la falta de información sobre la atmósfera entre 65 y 85 Km, el tránsito solar en 2004 permitió a los astrónomos recopilar una gran cantidad de datos útiles no solo para determinar la composición de la atmósfera superior de Venus, sino también para refinar las técnicas utilizadas en la búsqueda de planetas extrasolares; la atmósfera (en su mayor parte dióxido de Carbono) absorbe la radiación del IR cercano, lo que facilita su observación; durante el tránsito de 2004, la absorción en la atmósfera en función de la longitud de onda reveló las propiedades de los gases a esa altitud, el desplazamiento Doppler de los gases también permitió medir los patrones del viento; los tránsitos solares de Venus son un evento extremadamente raro, el último tránsito solar del planeta antes de 2004 fue en 1882, y el más reciente fue en 2012.



Atmósfera de la Tierra

En la Tierra, y posiblemente la mayor parte de los planetas con atmósferas ligeras, los volcanes proporcionaron los primeros ingredientes de los cuales se ha desarrollado la atmósfera actual (y los océanos).

El agua es el principal componente de los gases volcánicos en la superficie de la Tierra, constituyendo más del 75% en volumen, de todos los gases recogidos en las chimeneas volcánicas; otros componentes comunes comprenden el dióxido de Carbono (CO_2), óxido de Carbono (CO), vapor de Azufre (S), trióxido de Azufre (SO_3), sulfuro de Hidrógeno (H_2S), cloruro de Hidrógeno (HCI), anhídrido sulfúrico (SO_2), fluoruro de Hidrógeno (HF), ácido bórico (H_2BO_3), Nitrógeno (N_2), Argón (Ar), cloruro amónico (NH_4CI), metano (CH_4), y en menor abundancia Hidrógeno (H_2); No todos los componentes están siempre presentes, y sus abundancias relativas varían considerablemente, pero el agua (H_2O) es casi siempre predominante, y a menudo superabundante.

Es probable que a través de las edades geológicas, toda el agua de la superficie de la Tierra haya sido producida por los volcanes; los principales gases volcánicos se han acumulado durante los miles de millones de años desde que se formó la Tierra, y tuvieron lugar un número importante de cambios físicos y químicos, la atmósfera de la Tierra comenzó a ser relativamente estable hace 3800 millones de años.

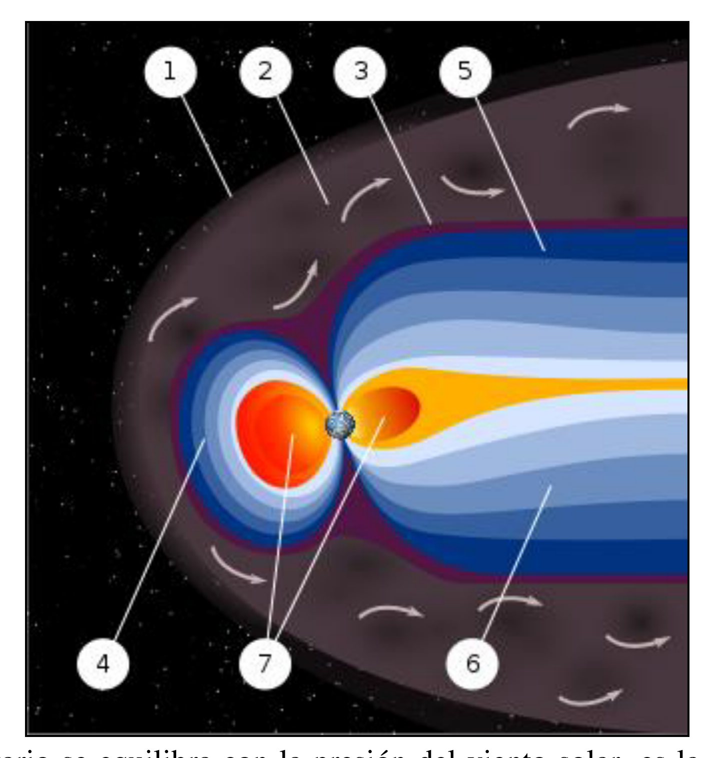
En presencia del agua, el dióxido de Carbono se ha retirado de la atmósfera y se ha convertido en rocas de carbonato; los otros materiales solubles en el agua y químicamente activos han sido disueltos y convertidos en varios minerales; el óxido de Carbono y metano han sufrido oxidación; el Nitrógeno y el Argón han permanecido en la atmósfera; el Hidrógeno ha sido oxidado y se ha escapado, el Oxígeno se ha producido por medio de la fotosíntesis, y el agua se ha retenido en la superficie en estado líquido y sólido.

Si se acepta el vulcanismo como el primer mecanismo para la producción de atmósferas de los planetas que no son suficientemente masivos para captar Hidrógeno y Helio en grandes cantidades, entonces es esencial la comprensión de la relación entre el grado de actividad volcánica y la masa planetaria para un entendimiento del curso general de la evolución atmosférica (se cree que la Tierra, en sus orígenes, era un planeta sacudido por la actividad volcánica; estudios actuales sugieren que los rayos y las emisiones de gases resultantes de las erupciones volcánicas pudieron producir los componentes químicos necesarios para la vida).



Magnetosfera

Es una capa atmosférica formada por la interacción del magnetismo de la tierra y el viento solar, se extiende por encima de la ionósfera, más arriba de los 500 Km de altura (en algunas fuentes figura con el nombre de exósfera; sin embargo, ese nombre se refiere a un concepto diferente, aunque ambos ocupan aproximadamente el mismo espacio en la parte superior de la atmósfera); esta capa protege a la Tierra de la llegada de radiación, especialmente del viento solar, y también de una parte de los rayos cósmicos, desviando las partículas cargadas hacia los polos magnéticos a través de mecanismos de reconexión electromagnética, lo que causa las auroras australes y boreales; si la magnetósfera no existiese en la Tierra, la cantidad constante de radiación a la que se ve sometida atravesaría la atmósfera, y llegaría hasta la superficie; una de las múltiples consecuencias de esto sería que el planeta habría ido perdiendo su agua, de la atmósfera como de los océanos, y probablemente la vida en la Tierra no sería posible, o sería de forma muy diferente a como la conocemos;



La magnetosfera posee una estructura, sobre el ecuador de la Tierra, las líneas del campo magnético se vuelven casi horizontales y luego regresan para reconectarse en latitudes altas. Sin embargo, a grandes altitudes, el campo magnético se ve significativamente distorsionado por el viento solar y su campo magnético solar, en el lado diurno de la Tierra, el viento solar comprime significativamente el campo magnético a una distancia de aproximadamente 65000 Km; el arco de choque (1) que forma la capa más externa tiene unos 17 Km de espesor y está ubicado a unos 90000 Km de la Tierra y reduce la velocidad del viento solar; la funda magnética (2) región de la magnetosfera que esta entre el arco de choque y la magnetopausa (a una distancia de varios cientos de Km sobre la superficie terrestre) se forma principalmente a partir del impacto del viento solar, aunque contiene una pequeña cantidad de plasma de la magnetosfera, es un área que exhibe un alto flujo de energía de partículas, donde la dirección y magnitud del campo magnético varía erráticamente; la magnetopausa (3), es el área de la magnetosfera donde la presión del campo magnético planetario se equilibra con la presión del viento solar, es la convergencia del viento solar impactado desde la envoltura magnética con el campo magnético del objeto y el plasma de la magnetosfera; debido a que ambos lados de esta convergencia contienen plasma magnetizado, las interacciones entre ellos son complejas; la magnetopausa cambia de tamaño y forma a medida que fluctúa la presión del viento solar; frente al campo magnético comprimido se encuentra la cola magnética, donde la magnetosfera se extiende mucho más allá de la Tierra, contiene dos lóbulos, denominados lóbulos de la cola N y S (las líneas de campo magnético en el lóbulo N (5) de la cola apuntan hacia la Tierra, mientras que las del lóbulo S (6) apuntan en dirección contraria); los lóbulos de la cola están casi vacíos, con pocas partículas cargadas que se oponen al flujo del viento solar, y están separados por una lámina de plasma, una zona donde el campo magnético es más débil y la densidad de partículas cargadas es mayor; en el lado nocturno de la Tierra, el campo magnético se extiende en la cola magnética, que a lo largo supera los 6300000 Km, y es la fuente principal de la aurora polar; la plasmasfera (7) es la región de la magnetosfera que consiste en plasma de baja energía, se encuentra por encima de la ionosfera; el límite exterior de la plasmasfera se conoce como plasmapausa, que se define por una caída de un orden de magnitud en la densidad del plasma, fue estudiada por los satélites ICE, y Explorer 1 y 3.

Estudios de la magnetosfera con cometas y nubes artificiales

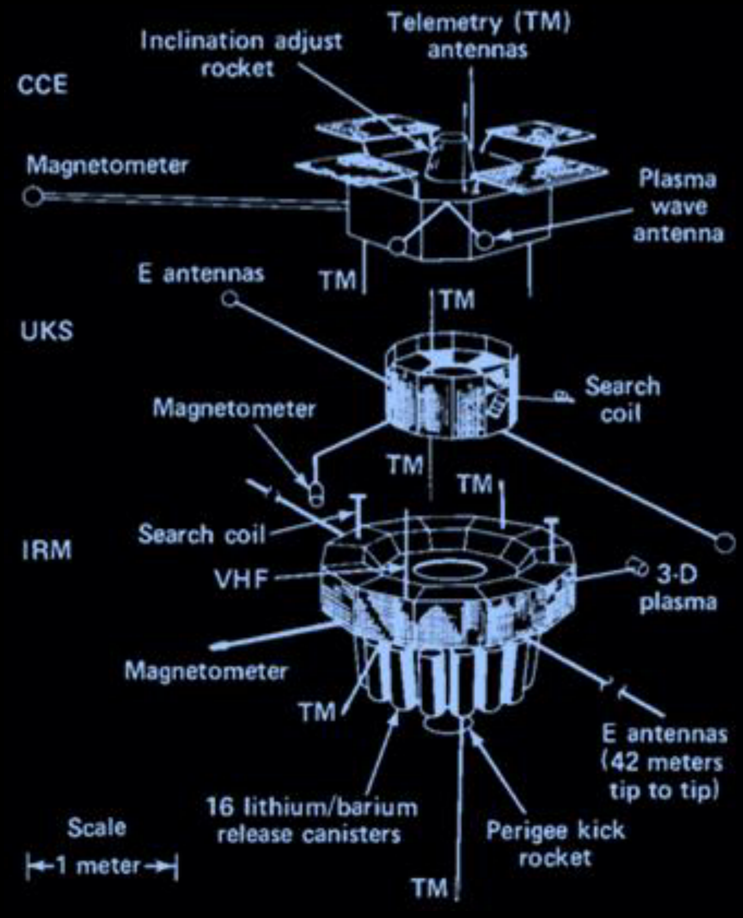
Proyecto AMPTE (Active Magnetospheric Particle Tracer Explorer)

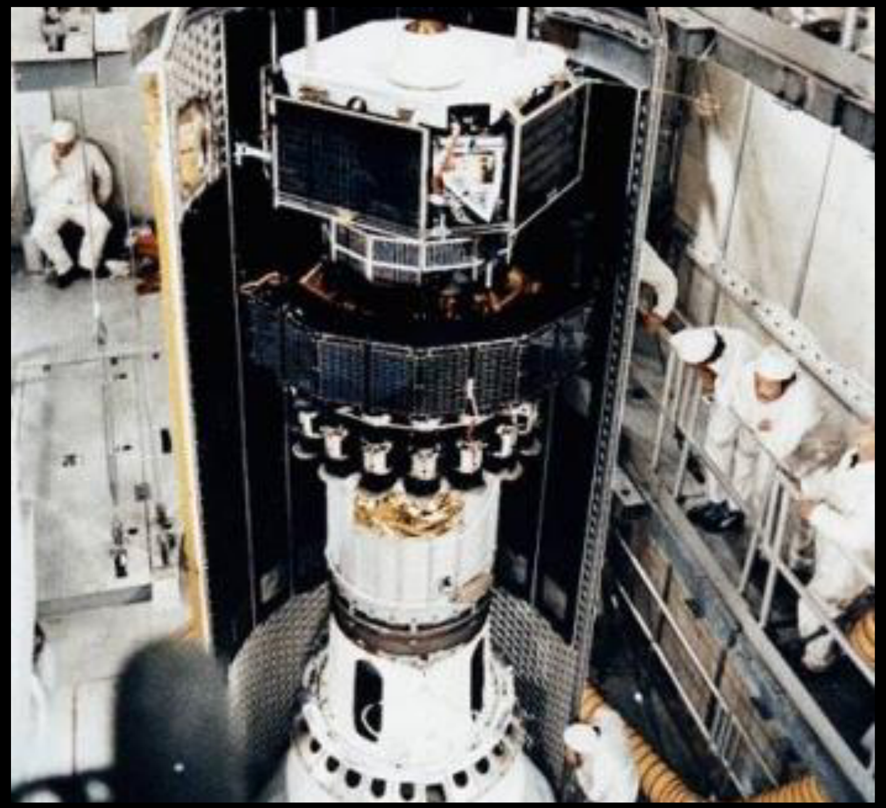
El 19-08-1984 fueron lanzados desde la plataforma LC-17A de Cabo Kennedy a bordo de un cohete Delta-3924 los satélites que serían utilizados posteriormente en el Proyecto AMPTE; el CCE (Charge Composition Explorer) también denominado Explorer-65, con un peso de 242 Kg, desarrollado conjuntamente entre la Universidad John Hopkins (JHAPL) y el centro NASA/Goddard, llevaba como instrumentos científicos un magnetómetro (MAG), experimento de composición de plasma caliente (HPCE), analizador de partículas de energía media (MEPA), espectrómetro de carga-energía-masa (CHEM) y un experimento de ondas de plasma (PWE), junto al CCE iría el satélite IRM (Ion Release Module) construido por el Instituto Max Planck de Alemania, con un peso de 705 Kg, llevaba entre sus instrumentos científicos un analizador de plasma 3-D, experimento de liberación de iones, espectrómetro de iones de separación de masas (MSIS), espectrómetro de ondas de plasma, analizador de carga iónica de energía supratérmica y un magnetómetro de flujo triaxial, luego de alcanzar la órbita de tránsito con un apogeo de 54000 Km, los satélites se separaron; el CCE continuó su órbita inicial, mientras que el IRM fue impulsado por su propio motor cohete hasta los 120000 Km para actuar como núcleo activo, desde esa trayectoria espacial inyectaría nubes artificiales visibles que oficiarían de trazadoras de los fenómenos de transporte en la magnetosfera; en septiembre de 1984 se inyectaron dos nubes de Litio entre el Sol y la zona frontal de la magnetosfera terrestre, las que únicamente fueron detectadas por el equipo de diagnóstico e instrumental de medición de los satélites en órbita.

El primer cometa artificial de la historia consistiría en una inyección de Bario realizada desde el satélite alemán IRM (Ion Release Module) que surcaría la magnetosfera terrestre mientras sería observado y filmado desde el avión Boeing-707-320C TC-91 de la FAA/CNIE, un Convair-990 de la NASA y por una red de observatorios terrestres los experimentos se realizarían con los satélites CCE e IRM para estudiar el acoplamiento entre el viento solar y la magnetosfera terrestre a través del trazado iónico obtenido con nubes artificiales.

El equipo de la I Brig. Aérea, Buenos Aires pudo instalar y alinear la plataforma de la cámara especial con un intensificador de imagen de alta sensibilidad, sistemas de observación nocturna con luz residual y seguimiento con capacidad para captar móviles de hasta 50 Km/seg de velocidad, helióstato suspendido en una plataforma inercial, puerta especial de observación con su correspondiente sistema desempañador sobre el lateral derecho del fuselaje, grabadoras de video, computadoras, consolas de operación y dos INS (Inertial Navigation System) LTN-72, independientes de los propios del avión y habilitar nuevos sistemas de comunicación VHF y HF.



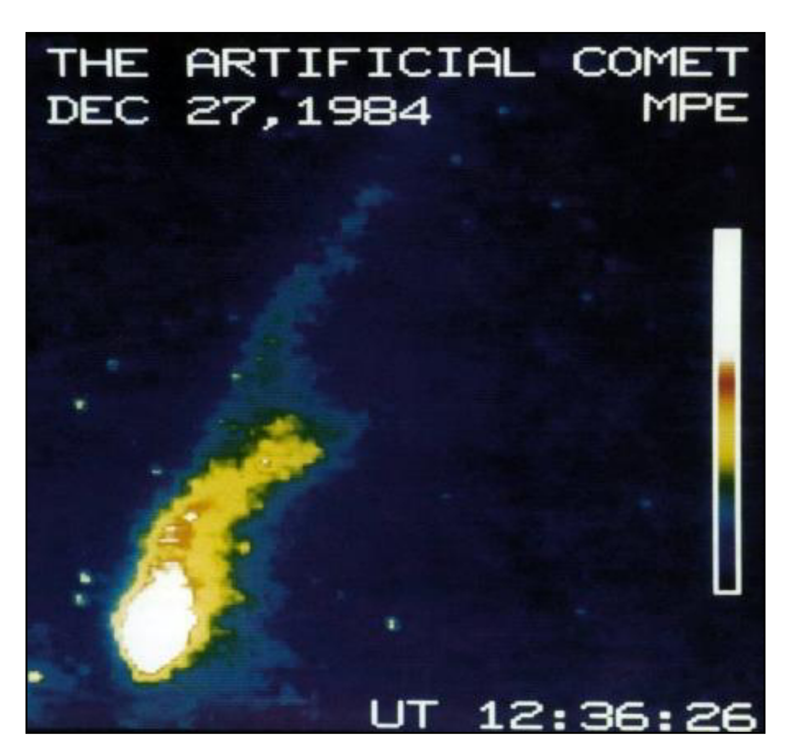

CCE
Inclination adjust rocket
Telemetry (TM) antennas
Magnetometer
Plasma wave antenna
E antennas
TM
TM
UKS
Search coil
Magnetometer
TM
TM
Search coil
IRM
VHF
3-D plasma
Magnetometer
TM
E antennas (42 meters tip to tip)
16 lithium/barium release canisters
Perigee kick rocket
Scale
1 meter
TM



El 19-12-1984, partía desde el Aeropuerto de El Plumerillo, Mendoza, el Boeing-707 TC-91 y tras una escala en la Isla de Pascua, llegaba al Aeropuerto de Papetee, Tahití; la primera inyección de 2,5 Kg de Bario para formar el cometa artificial se realizaría el 25-12-1984; la nube sería observada por una red de observatorios terrestres en el hemisferio N y por los dos laboratorios aéreos, en la madrugada del 21-12-1984 se llevó a cabo la práctica de un circuito de espera reglamentario y una corrida de observación tal como sería efectuada cuando se hiciera la experiencia programada, ese tramo final de la ruta tenía que ser ejecutado con rumbo, velocidad y alturas precomputadas, el cometa se formaría en una posición relativa de 90º respecto del avión observador y dentro de una elevación no menor a 20º y no mayor a 50º con respecto a su plano horizontal, para la práctica se eligió una estrella de 1° magnitud con altura y azimut a los que tendría el cometa artificial, datos que fueron introducidos en una de las computadoras del TC-91 para apuntar las cámaras de TV al objetivo.

El despegue se produjo con condiciones meteorológicas que no eran satisfactorias en los lugares destacados del hemisferio N, desde donde se efectuarían las observaciones complementarias, pero se alentaba la esperanza de una razonable mejoría en las 3 hrs que faltaban para hacer la inyección; cuando el TC-91 ya se encontraba en la zona de observación y a pocos minutos de la hora H (momento de lanzamiento de la nube de Bario), las condiciones meteorológicas sobre los observatorios de Monte Palomar, Fairbank, Kitt Peak y Hawaii continuaban sin mejorar; el éxito del experimento exigía que estuvieran en condiciones operativas por lo menos dos observatorios terrestres o aéreos, pero hasta allí solamente se encontraba listo el TC-91 que volaban sin calefacción para obtener la temperatura conveniente (menos de 0° C) para el funcionamiento óptimo de los equipos; menos de 3 min. antes de la hora H, el director del proyecto tomó una decisión clave ordenando por radio la suspensión del experimento mediante la inhibición de la salida de la nube de Bario contenida en el satélite artificial.

Por razones científicas la demora no podía extenderse más allá de las 48 hrs y para no postergar el experimento estaba fijado en la madrugada del 27-12-1984; aunque con malas condiciones meteorológicas, el B-707 estaba en condiciones de comenzar el primero de los dos circuitos de espera programados, las informaciones recibidas a bordo desde los puestos terrestres de observación indicaban su inoperabilidad por causas meteorológicas; el Convair-990 de la NASA había podido despegar normalmente y estaba próximo a la posición requerida para cumplir su tarea; 14 min. después, el B-707 abandonó el último circuito de espera y se orientó hacia el punto de su programa de vuelo, posición que debía ser alcanzada con toda precisión para coincidir con la inyección de Bario y luego, haciendo la corrida de observación, reunir información sobre la experiencia; como había sido organizado a la hora señalada del 27-12-1984 el satélite IRM inyectó en el espacio 1,25 Kg de Bario; mientras que el sonido de radio era total, los científicos observaban el fenómeno en sus monitores, que a los 4 min. de formarse el primer cometa artificial se formó una segunda cola, que arrastró gran parte de los iones, llevándolos en otra dirección.



Como se empleó la mitad de la carga de Bario, sólo se pudo observar y filmar el acontecimiento alrededor de 15 min., con lo cual finalizaría este tramo del Proyecto AMPTE.

Programa CRRES (Combined Release and Radiation Effects Satellite Program)



CRRES fue un programa conjunto entre la NASA y la USAF; la Div. Física Espacial de la Oficina de Ciencias y Aplicaciones Espaciales de la NASA era la responsable del programa de liberación de sustancias químicas; la Div. Sistemas Espaciales de la USAF era la responsable del programa de experimentos del Dto. de Defensa; el satélite CRRES y la campaña científica del satélite era administrado por el centro NASA/Marshall, el satélite Pegsat fue desarrollado por el centro NASA/Goddard como un programa conjunto de la NASA y la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (DARPA), el programa estaba orientado al estudio de la magnetosfera terrestre, considerando inyectar en el espacio desde un satélite elementos químicos como el Bario, Estroncio, Boro o Litio, que mostraran las líneas de los campos eléctricos y magnéticos que rodean la Tierra, el estudio de los efectos mediante observaciones ópticas, con radio o radar, suministraron información acerca de la interacción de las radiaciones solares, átomos, iones y campos electromagnéticos, como también la reacción de la ionosfera frente a la aplicación de altos niveles de energía externa, como es el caso de una erupción solar.

Tenía un alcance internacional con la participación de científicos de Estados Unidos, Puerto Rico, Canadá, Alemania, Argentina y la Unión Soviética; las descargas realizadas por el satélite CRRES fueron estudiadas durante varios experimentos y con una amplia gama de instrumentos instalados en tierra y a bordo de aviones; los puestos de observación para medir con precisión las ubicaciones de las emisiones por triangulación se encontraban en el centro NASA/Goddard, Los Álamos National Lab., White Sands Test Facility, Boston Lincoln Test Facility, Long Key, Richmond Hill y Rosemary Hill en Estados Unidos; Observatorio Cerro Tololo en Chile; Observatorio El leoncito y III Brig. Aérea en Argentina; St. Thomas, Aruba, St. Croix y Bonaire en el Caribe.

Observatorio El Leoncito

Las instalaciones de radar en Arecibo, Puerto Rico; Kwajalein, Islas Marshall; y Millstone Hill, Estados Unidos; se utilizarían como herramientas de diagnóstico primarias, estos radares transmitían poderosos pulsos de energía de radio a la ionosfera, analizando y midiendo con precisión los débiles retornos de las partículas cargadas eléctricamente allí, la cantidad y velocidad de las partículas ionosféricas, y su modificación por una perturbación de liberación química.

Las cámaras que se llevarían en las aeronaves se utilizarán para evitar la pérdida de datos debido al mal tiempo local, el Boeing-707 TC-91, operado por la CNIE, proporcionaría datos ópticos desde el extremo S de los chorros de iones que se movían a lo largo de las líneas del campo magnético, éste y otros aviones especiales de la NASA, el Dto. de Defensa de Estados Unidos y Aeromet Inc. contendrían cámaras, plataformas de giroscopios para estabilización de las imágenes, sistemas de navegación y señalización controlados por computadora para apuntar las cámaras al punto correcto del cielo.





El satélite CRRES fue lanzado el 25-07-1990 a bordo de un cohete Atlas-Centaur, llegando a una órbita elíptica a través del Cinturón de Van Allen, de 350 x 36000 Km; esta trayectoria era conocida con suficiente exactitud, de manera que los científicos pudieran determinar el punto preciso para que ocurriera la descarga; al Programa CRRES también se le asoció el satélite Pegsat, con un peso de 178 Kg y puesto en órbita el 05-04-1990 mediante un cohete Pegasus lanzado desde un avión Boeing B-52 que despegó desde la Base Aérea Edwards, Estados Unidos.

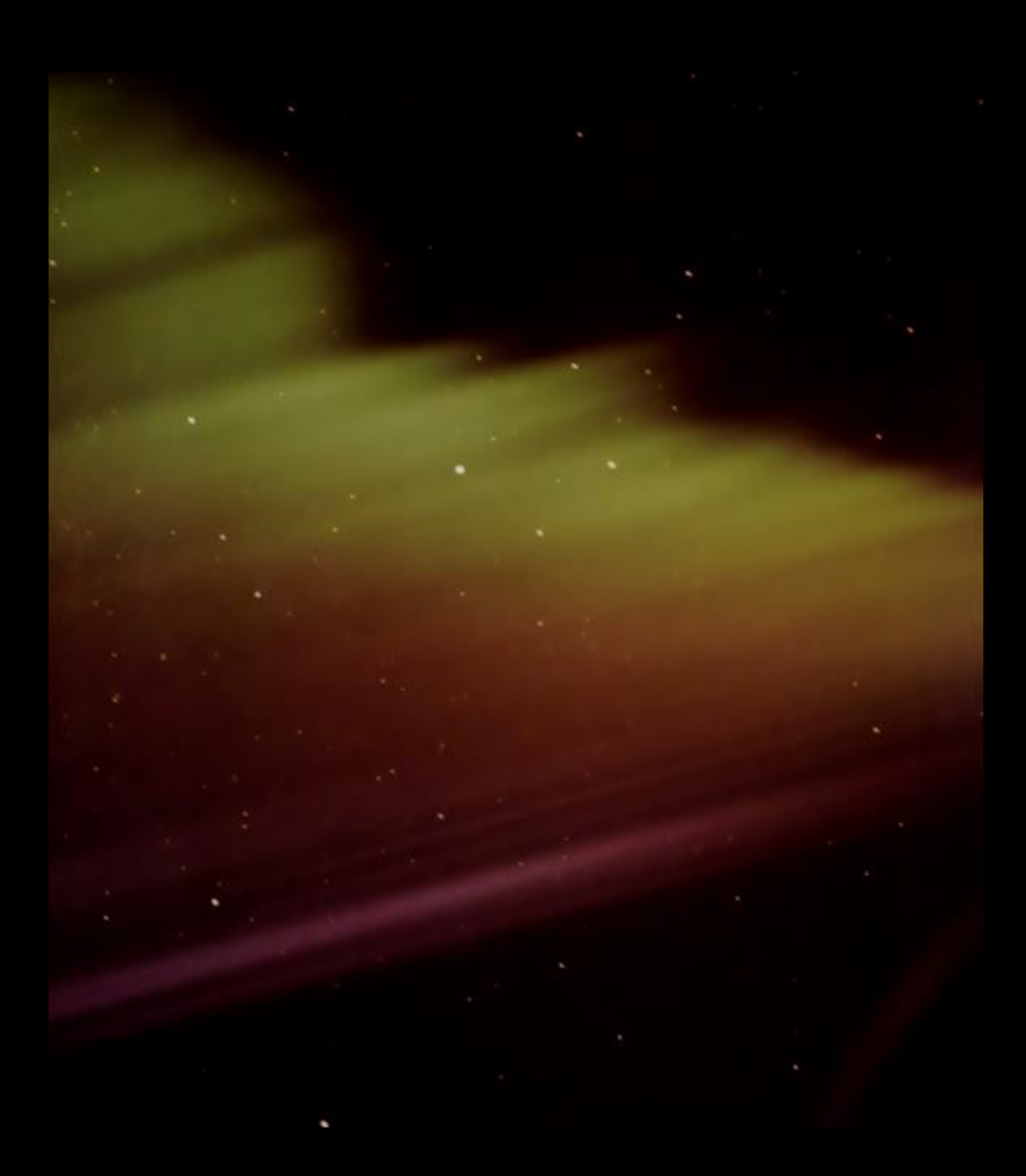


Satélite Pegsat



Satélite CRRES

Argentina tuvo una participación activa en las campañas de observación de los químicos lanzados en los experimentos G-1 (13-07-1991) cavidad diamagnética, acoplamiento de plasma (1,2 Kg de Titanio; 572 grs de Boro; 1,5 Kg de Bario; 19 grs de Estroncio) con la participación del avión Boeing-707 TC-91 y la III Brig. Aérea Reconquista, Santa Fe; experimentos G-3 (15-01-1991) cavidad magnética, distribución de velocidad inestable, acoplamiento de plasma (1,3 Kg de Titanio; 1,5 Kg de Bario; 574 grs de Boro; 19 grs de Estroncio); G-4 (16-01-1991) cavidad diamagnética, acoplamiento de plasma (1,3 Kg de Titanio; 1,5 Kg de Bario; 19 grs de Estroncio; 574 grs de Boro); G-5 (18-01-1991) precipitación de electrones estimulada para producir auroras (20 Kg de Litio); G-6 (12-02-1991) estimulación de ondas de iones-ciclotrones y precipitación de iones artificiales (20 Kg de Litio) y G-8 (17-02-1991) inestabilidad gravitacional, equipotencialidad de campo, aceleración ambipolar (40 Kg de Bario) en que participó el Observatorio El Leoncito, San Juan; experimentos G-7 (13-01-1991) trazado de iones y aceleración (20 Kg de Litio); G-9 (19-07-1991) trazado de línea de campo y equipotencialidad (40 Kg de Bario); G-10 (20-01-1991) estimulación de subtormenta magnetosférica (67 grs de Estroncio; 9 Kg de Titanio; 5 Kg de Boro; 67 grs de Litio) y G-11a (22-07-1991) equipotencialidad de campo, aceleración ambipolar (10 Kg de Bario) con la participación del avión Boeing-707 TC-91 y el Observatorio El leoncito.



Exosfera

La exosfera es la capa más externa de la atmósfera terrestre (límite superior de la atmósfera) se extiende desde la exobase, que se encuentra en la parte superior de la termosfera a una altitud de aproximadamente 700 Km sobre el nivel del mar, hasta aproximadamente 10000 Km donde se fusiona con el viento solar, esta capa esta compuesta principalmente de densidades extremadamente bajas de Hidrógeno, Helio y moléculas más pesadas que incluyen Nitrógeno, Oxígeno y dióxido de Carbono más cerca de la exobase, los átomos y las moléculas están tan separados que pueden viajar cientos de Km sin chocar entre sí, por lo que la exosfera ya no se comporta como un gas y las partículas escapan constantemente al espacio (estas partículas en movimiento libre siguen trayectorias balísticas y pueden migrar dentro y fuera de la magnetosfera o el viento solar).

La exosfera está demasiado por encima de la Tierra para que sean posibles los fenómenos meteorológicos. Sin embargo, la aurora boreal y la aurora austral a veces ocurren en la parte inferior de la exosfera, donde se superpone con la termosfera; las moléculas más comunes dentro de la exosfera de la Tierra son las de los gases atmosféricos más ligeros, el Hidrógeno está presente en toda la exosfera, con algo de Helio, dióxido de Carbono y Oxígeno atómico cerca de su base, debido a que puede ser difícil definir el límite entre la exosfera y el espacio exterior, la exosfera puede considerarse parte del espacio interplanetario o exterior, la temperatura en la Exosfera puede exceder los 2000 °C.

El límite inferior de la exosfera se llama exobase (también denominada altitud crítica), ya que es la altitud en la que ya no se aplican las condiciones barométricas, la temperatura atmosférica se vuelve casi constante por encima de esta altitud y varía de 500 a 1000 Km dependiendo de la actividad solar.

Algunos científicos no consideran que la exosfera sea parte de la atmósfera, esto se debe a que tiene similitudes de densidad con el vacío sin aire en el espacio exterior.

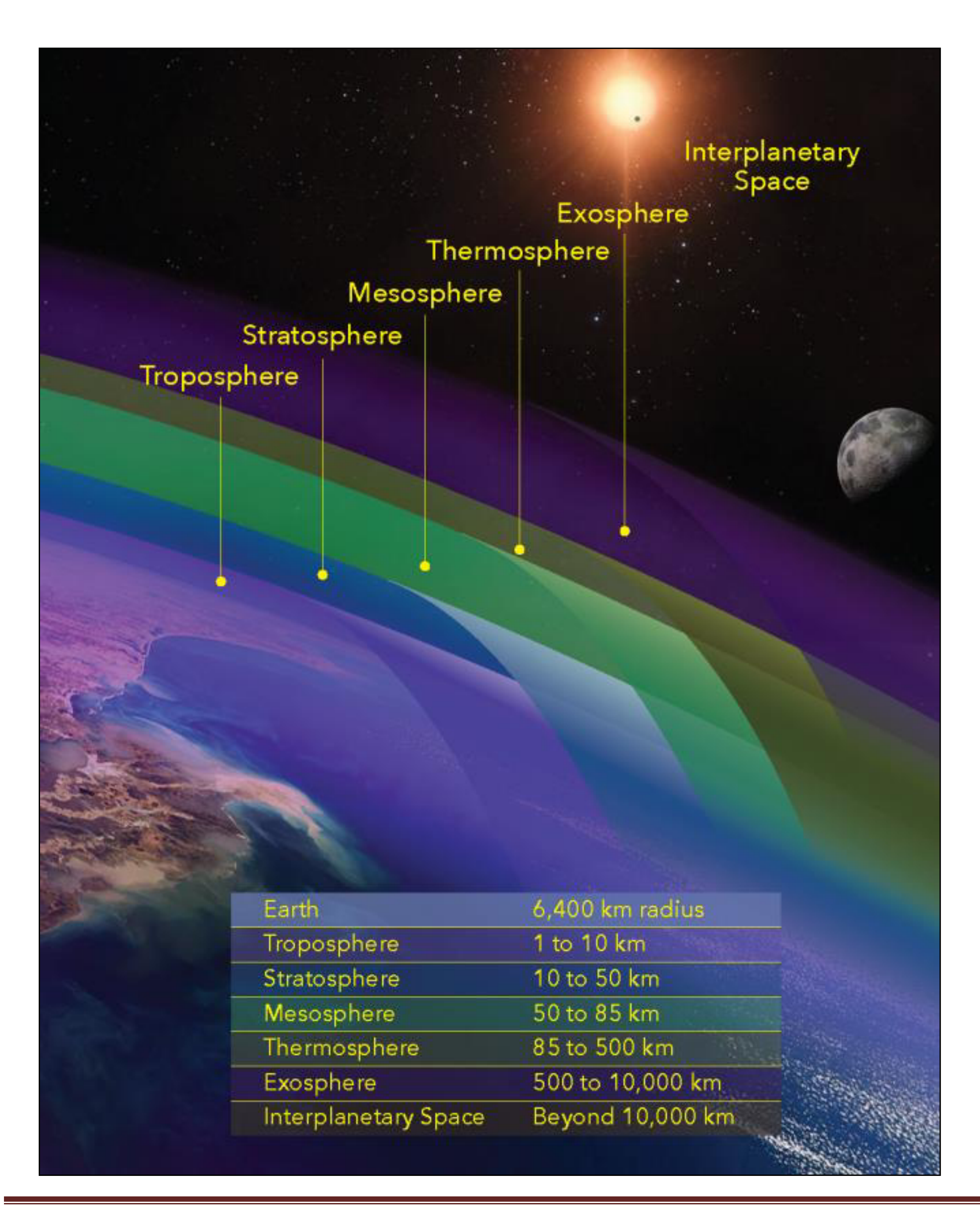
Termosfera

Es la segunda capa más alta de la atmósfera, se extiende desde la mesopausa (que la separa de la mesosfera) a una altitud de aproximadamente 80 Km hasta la termopausa en un rango de altitud de 500-1000 Km.

La altura de la termopausa varía considerablemente por los cambios en la actividad solar (como se encuentra en el límite inferior de la exosfera, también se la conoce como exobase) la parte inferior de la termosfera, de 80 a 550 Km sobre la superficie de la Tierra, contiene la ionosfera.

La temperatura de la termosfera aumenta gradualmente con la altura y puede llegar hasta 1500 °C, aunque las moléculas de gas están tan separadas que su temperatura en el sentido habitual no es muy significativa, el aire está tan enrarecido que una molécula individual viaja un promedio de 1 Km entre colisiones con otras moléculas.

Aunque la termosfera tiene una alta proporción de moléculas con alta energía, no se sentiría caliente para un humano en contacto directo, porque su densidad es demasiado baja para conducir una cantidad significativa de energía hacia o desde la piel; está completamente despejada y libre de vapor de H_2O, pero ocasionalmente se observan en la termosfera fenómenos no hidrometeorológicos como la auroras boreales y australes, en esta capa (350/420 Km) orbita la Estación Espacial Internacional (ISS) y diversos satélites.


Interplanetary Space
Exosphere
Thermosphere
Mesosphere
Stratosphere
Troposphere
Earth
6,400 km radius
Troposphere
1 to 10 km
Stratosphere
10 to 50 km
Mesosphere
50 to 85 km
Thermosphere
85 to 500 km
Exosphere
500 to 10,000 km
Interplanetary Space
Beyond 10,000 km

Ionosfera

Se sitúa entre la mesosfera y la exosfera, y en promedio se extiende aproximadamente entre los 80 y 400 Km de altitud, aunque los límites inferior y superior varían según autores y se quedan en 80-90 Km respectivamente, por otra parte, algunos consideran que la alta ionosfera constituye el límite inferior de la magnetosfera, solapándose ligeramente ambas capas (entre 500 y 600-800 Km); la ionosfera pertenece a la termosfera, por las temperaturas altas que se alcanzan en ella debido a que los gases están generalmente ionizados.

Si el Sol está activo, las temperaturas en la termosfera pueden llegar a 1500 °C; sin embargo, estas elevadas temperaturas no se corresponden con la sensación de calor que tendríamos en la troposfera porque en la termosfera la densidad es muchísimo más baja, los gases aparecen ionizados porque esta capa absorbe las radiaciones solares de menor longitud de onda (rayos X y rayos γ) que son altamente energéticos.

La ionosfera, contribuye esencialmente en la reflexión de las ondas de radio emitidas desde la superficie de la Tierra, posibilitando que estas puedan viajar grandes distancias sobre la Tierra gracias a las partículas de iones (cargadas de electricidad) presentes en esta capa; además, en esta capa se desintegran la mayoría de meteoroides, a una altura entre 80 y 110 Km, debido al rozamiento con el aire y dando lugar a meteoros o estrellas fugaces; en las regiones polares las partículas cargadas portadas por el viento solar son atrapadas por el campo magnético terrestre incidiendo sobre la parte superior de la ionosfera y dando lugar a la formación de auroras.

Existe una diferencia entre los criterios seguidos para designar una capa como termosfera o ionosfera, por lo que se trata de dos entidades físicas a priori diferentes, mientras que la designación de termosfera se basa simplemente en el perfil de temperaturas vertical, el criterio para designar la ionosfera hace referencia a la presencia destacable de iones y eso tiene relación con la energía solar que utilizan los escasos átomos de gases del aire para ionizarse; la ionización es el proceso que provoca que gran parte del aire se caliente. Sin embargo, los límites obtenidos con ambos criterios son muy difusos y además coinciden entre sí; según algunos autores la ionosfera estaría contenida en la termosfera, mientras que según otros, la termosfera se contendría en la ionosfera; sin embargo, los intervalos de ambas capas son aproximadamente coincidentes en todos los casos.

A pesar de ello, existe una pequeña diferencia entre el criterio de la ionización y el de la temperatura, y es que debido a la variación de la radiación solar entre el día y la noche, la ionización de las capas altas de la atmósfera cambian más bruscamente con el ciclo diario que el perfil de temperatura vertical, que se mantiene constante, por ese motivo, los límites asociados a la ionosfera son todavía más variables que los de la termosfera; el límite inferior de la ionosfera es muy variable, mientras que por la noche se encuentra en la capa E (110 Km), durante el día aparece una capa D (60 Km); la explicación de este hecho es porque la radiación UV es absorbida por los gases que forman el aire en las capas atmosféricas más elevadas durante la noche y también durante el día (en mayor proporción, obviamente) y transformada en iones, que son buenos conductores de la electricidad, lo mismo que vemos en la producción de las auroras polares, las cuales se deben también a este proceso (la radiación solar contiene longitudes de onda que van desde los rayos IR (de mayor longitud de onda) hasta los UV (de menor longitud de onda), el espectro visible solo va desde el rojo hasta el violeta; la mayor parte de los rayos UV que nos llegan del sol son filtrados en las capas superiores de la atmósfera transformando los escasos átomos de gases atmosféricos en iones y esta ionización es la que calienta esa capa ionizada, ya que dicha ionización corresponde a una verdadera excitación electrónica que causa el aumento del calor de la termosfera; dicho calor, aunque puede ser muy elevado, carece de sentido por estar producido en un ambiente muy enrarecido de gases; los rayos UV del espectro solar ionizan las capas altas de la atmósfera y, a su vez, la capa ionizada impide la propagación hacia la superficie terrestre de los nuevos rayos UV cuando mayor es la intensidad de la radiación solar (en horas del mediodía), y la ionización se profundiza más en la atmósfera.

En la ionosfera, los gases atmosféricos son tan tenues que es posible encontrar electrones libres e iones positivos, posee por lo tanto propiedades de un gas tenue y de un plasma; la masa total de la ionosfera es inferior a un 0,1 % de la masa de la atmósfera (las cargas se separan por la acción de las radiaciones de alta energía provenientes del Sol, en las capas tenues de la ionosfera los tiempos de recombinación de los iones son superiores al periodo día noche por lo que retiene gran parte de sus propiedades incluso en las regiones no iluminadas del planeta.

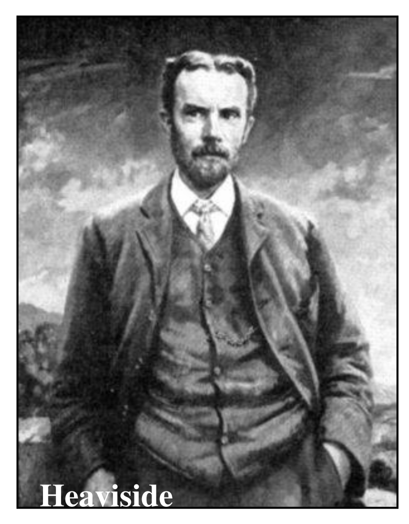
Las capas de la ionosfera son la capa D (60 Km), solo aparece durante el día y es sumamente absorbente para las frecuencias por debajo de unos 10 MHz, protegiendo la superficie terrestre de gran parte de la radiación espacial; la capa E -capa de Heaviside- (80-110 Km); capas F -capas de Appleton- (180-600 Km) se elevan por la noche por lo que cambian sus propiedades de reflexión; capa F1 (180-300 Km), esta capa sufre una fluctuación diaria mayor que la F2, por lo que llega a mezclarse con ésta; capa F2 (300-600 Km) es la capa más alta de la ionosfera; debido a que el grado de ionización es producido directamente por la acción solar, una actividad anómala del Sol puede alterar las propiedades de la ionosfera y su capacidad de reflejar las ondas de radio terrestre alterando las comunicaciones en la Tierra.

En 1839, el matemático y físico alemán Carl Friedrich Gauss postuló que una región de la atmósfera conductora de electricidad podría explicar las variaciones observadas en el campo magnético terrestre; luego, el 12-12-1901 Guillermo Marconi recibió la primer señal de radio transatlántica (código Morse) en San Juan de Terranova (Canadá) utilizando una antena apoyada en una cometa para su recepción; la estación transmisora de Poldhu, Cornualles, utilizaba un transmisor para producir una señal con una frecuencia de 500 kHz y una potencia 100 veces superior a cualquier señal de radio producida anteriormente, la señal tendría que rebotar dos veces en la ionosfera, en 1902 Marconi lograría nuevamente comunicaciones inalámbricas transatlánticas; también, en este año Oliver Heaviside propuso la existencia de la capa Kennelly-Heaviside de la ionosfera que lleva su nombre, su propuesta incluía los medios por los que las señales de radio se transmiten alrededor de la curvatura de la Tierra y Arthur Kennelly descubrió algunas de las propiedades radioeléctricas de la ionosfera.

En 1912, Estados Unidos impuso a radioaficionados la Ley de Radio, limitando sus operaciones a frecuencias superiores a 1,5 MHz (longitud de onda ≥ 200 m), conduciendo al descubrimiento de la propagación de la radio de alta frecuencia a través de la ionosfera en 1923; el físico Robert Watson-Watt introdujo el término ionosfera en una carta publicada recién en 1969.

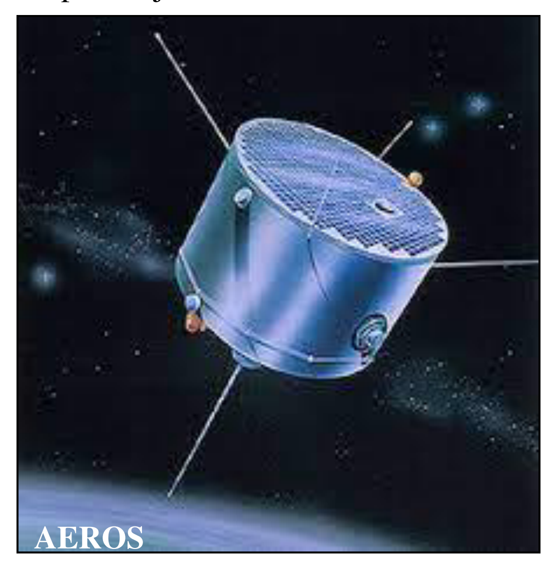
Edward Appleton fue galardonado con un Premio Nobel en 1947 por su confirmación en 1927 de la existencia de la ionosfera; Lloyd Berkner midió por primera vez la altura y la densidad de la ionosfera, permitiendo la primera teoría completa de la propagación de la radio de onda corta.

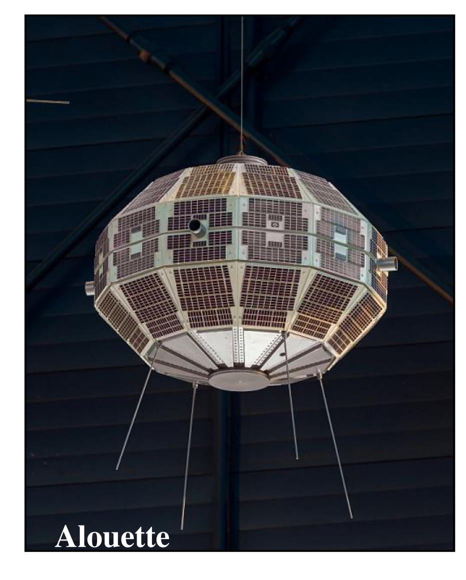

Marconi

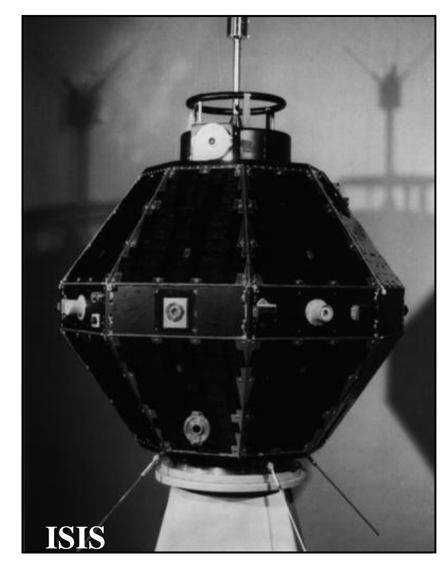

Heaviside


Appleton

El 29-09-1962 fue lanzado el satélite Alouette-1, tras su éxito serían lanzados los satélites Alouette-2 (29-11-1965); y los International Satellites for Ionospheric Studies ISIS-1 (30-01-1969) e ISIS-2 (01-04-1971) todos en cooperación Estados Unidos-Canadá para el estudio de la ionosfera; también serían lanzados los satélites AEROS-A (16-12-1972) y AEROS B (16-06-1975) proyecto cooperativo entre la República Federal Alemana y Estados Unidos, los satélites debían estudiar la aeronomía (ciencia de la atmósfera superior y la ionosfera), en particular la capa F bajo la fuerte influencia de la radiación solar UV extrema.


AEROS

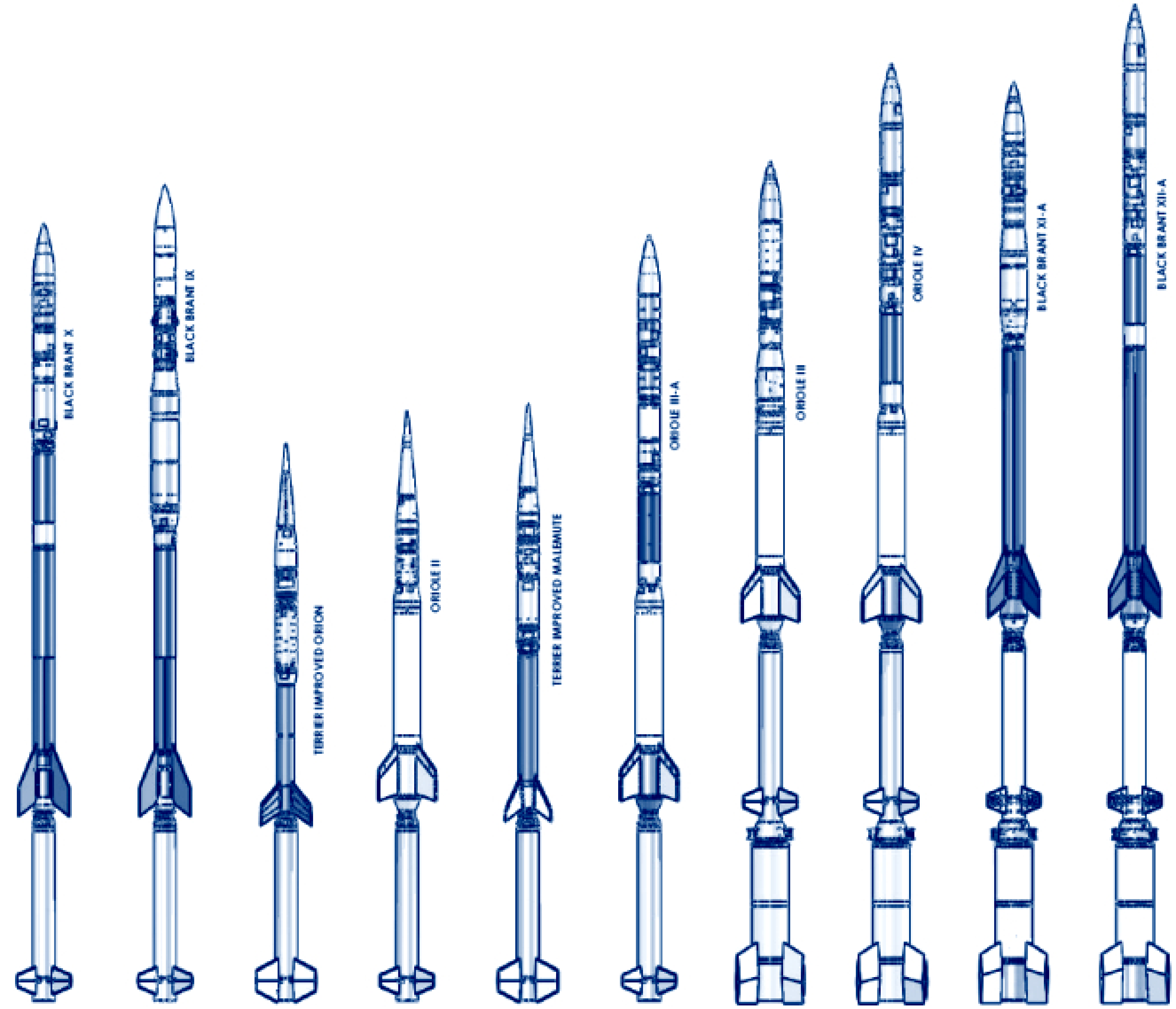

Alouette


ISIS

También, alrededor del mundo fueron lanzados cohetes sonda, (también llamados cohete de investigación), cohete portador de instrumentos diseñado para tomar mediciones y realizar experimentos científicos durante su vuelo suborbital, se utilizan para lanzar instrumentos desde 48 a 145 Km sobre la superficie de la Tierra (altitud generalmente entre globos meteorológicos y satélites); algunos cohetes sonda tienen un apogeo entre 1000 y 1500 Km; los elementos básicos de un cohete sonda son un motor de cohete de combustible sólido y una carga útil científica, los más grandes y de mayor altitud tienen de dos a tres etapas para aumentar la eficiencia y capacidad de carga útil (radiosonda para el registro de datos sobre temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica y densidad del aire durante el vuelo y datos sobre altitud, longitud/latidud); la parte de caída libre del vuelo es una trayectoria elíptica con un eje mayor vertical que permite que la carga útil parezca flotar cerca de su apogeo; el tiempo medio de vuelo es inferior a 30 min; el cohete consume su combustible en la 1° etapa de la parte ascendente del vuelo, luego se separa y cae, dejando que la carga útil complete el arco y regrese al suelo en paracaídas

Este tipo de cohetes ha sido operado por diversas agencias y organismos espaciales, destacándose el Centro Espacial Andøya, Noruega, que opera dos sitios de lanzamiento, Andøya y Svalbard, y lanza cohetes sonda desde 1962; el programa británico de cohetes sonda Skylark realizó lanzamientos entre 1957 y 2005; el Centro Espacial Vikram Sarabhai del ISRO (India) que desarrolló la serie de cohetes sonda Rohini (RH-200, RH-300, RH 560) para estudiar la actitud en los vientos neutros y dinámica de plasma, en algunos casos se alcanzaron altitudes de 500 Km.

La agencia espacial de Japón (JAXA) opera los cohetes sonda serie S (S-310, S-520, SS-520); la NASA opera una gran cantidad de cohetes sonda cuyos lanzamientos se realizan desde el Centro Espacial Wallops; la agencia espacial argentina CNIE lanzó cohetes sonda de diverso tipo desde los sitios de lanzamiento El Chamical, La Rioja y Mar Chiquita, Bs. As. desde 1962 a 1981 para estudios de aeronomía inyectando nubes de Sodio en la ionosfera, su mayor cohete (Castor) llegó hasta un apogeo de 500 Km; la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) de Perú, construyó y lanzó desde el sitio de lanzamiento Punta Lobos los cohetes sonda Paulet, convirtiéndose en el tercer país en lanzar este tipo de cohetes en Sudamérica; Indonesia construyó el cohete sonda Kartika I en 1964, convirtiéndose en el tercer cohete de sonda en Asia; la Unión Soviética desarrolló un extenso programa utilizando cohetes sonda M-100, MR-20 y MR-30; la Agencia Espacial de Brasil AEB realizó desde 1965 lanzamientos de de cohetes Sonda desde el Centro Espacial Barreira do Inferno, constituyendo la base de investigación y desarrollo para cohetes sonda posteriores; la agencia espacial de Pakistán SUPARCO desde 1962 a 1971 lanzó la serie de cohetes sonda Rehbar (basados en los cohetes Nike Cajun de Estados Unidos); desde el European Space Research Range (ESRANGE), sitio de lanzamiento en Suecia, se han lanzado los cohetes sonda alemanes Texus, los germano-suecos Maser y Resus, y los cohetes de Suecia Maxus; Francia con organizaciones espaciales como la ONERA y el CNES llevó a cabo una gran cantidad de lanzamientos de cohetes sonda Veronique, Dragon, Centaure, Bélier, Vesta, entre otros; realizando estudios de aeronomía desde diversos sitios de lanzamiento de Francia, Argelia y Sudamérica.



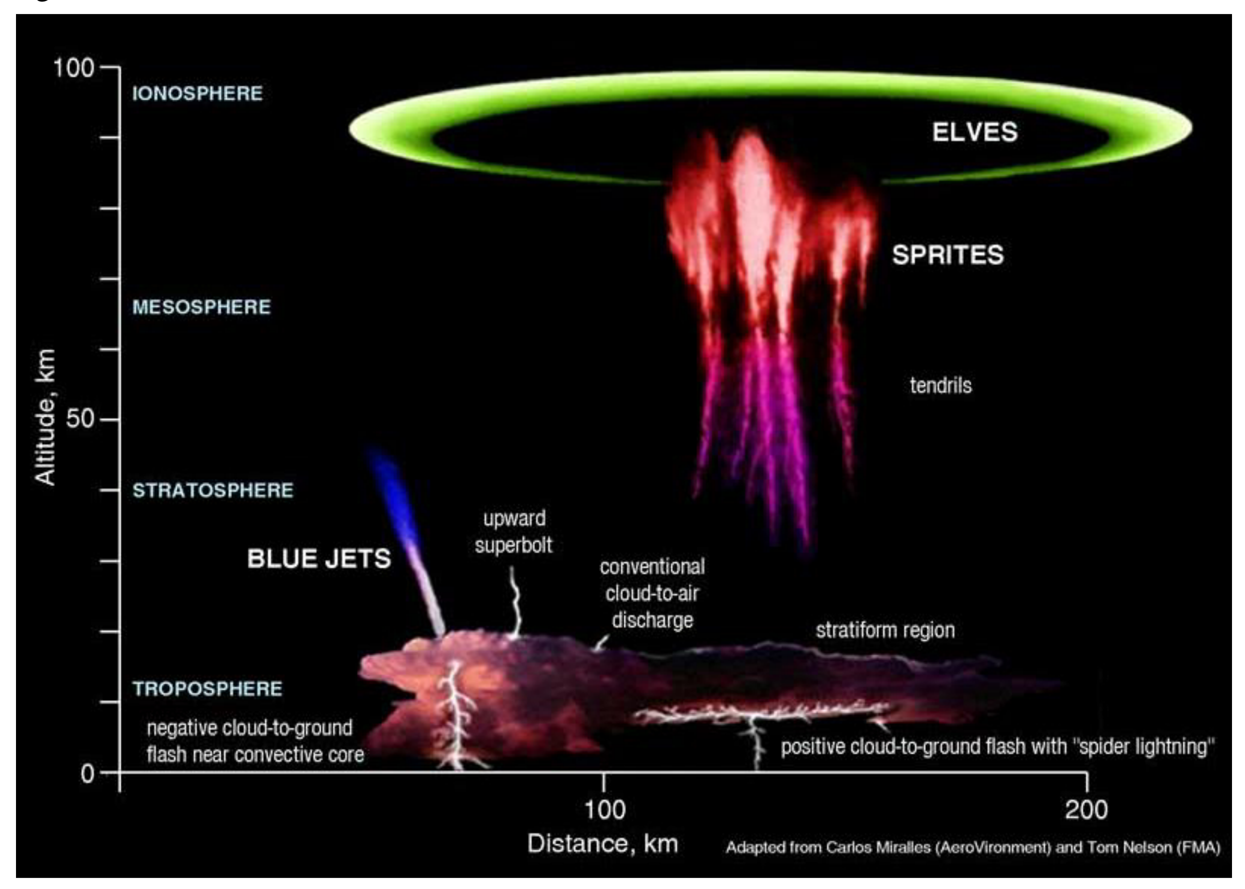
Mesosfera

Es la tercera capa más alta de la atmósfera terrestre, ocupando la región por encima de la estratosfera y por debajo de la termosfera; se extiende desde la estratopausa a una altitud de aproximadamente 50 Km hasta la mesopausa a 80-85 Km sobre el nivel del mar; las temperaturas descienden al aumentar la altitud hasta la mesopausa que marca la parte superior de esta capa intermedia de la atmósfera (es el lugar más frío de la Tierra y tiene una temperatura promedio de -85 °C).

Debajo de la mesopausa, el aire es tan frío que incluso el escaso vapor de H_2O a esta altitud puede sublimarse en nubes noctilucentes mesosféricas polares (nubes más altas de la atmósfera y pueden ser visibles a simple vista si la luz del Sol se refleja en ellas una o dos horas después del atardecer o de manera similar antes del amanecer).

Las descargas inducidas por rayos conocidas como eventos luminosos transitorios (TLE) se forman de manera ocasional en la mesosfera por encima de las nubes de tormenta troposféricas; la mesosfera es también la capa donde la mayoría de los meteoros arden en la entrada atmosférica, está demasiado alto por encima de la Tierra para que sea accesible a aviones propulsados por reactores y globos, y demasiado bajo para permitir el paso de naves espaciales orbitales, se accede a la mesosfera mediante cohetes sonda y aviones propulsados por cohetes.

Las principales características más importantes de esta región son los fuertes vientos zonales (E-O), las mareas atmosféricas, las ondas de gravedad atmosféricas internas (comúnmente llamadas ondas de gravedad) y las ondas planetarias, la mayoría de estas mareas y olas comienzan en la troposfera y la estratosfera inferior y se propagan a la mesosfera; en la mesosfera, las amplitudes de las ondas de gravedad pueden volverse tan grandes que las ondas se vuelven inestables y se disipan, esta disipación deposita impulso en la mesosfera y en gran medida impulsa la circulación global.



La mesosfera superior es también la región de la ionosfera conocida como capa D, que solo está presente durante el día, cuando se produce cierta ionización con el óxido nítrico ionizado por la radiación de Hidrógeno de la serie Lyman α; la ionización es tan débil que cuando cae la noche y se elimina la fuente de ionización, el electrón libre y el ión se vuelven a formar en una molécula neutra; se ha denominado también ignorosfera porque está poco estudiada en relación con la estratosfera (a la que se puede acceder con globos de gran altitud) y la termosfera (en la que los satélites pueden orbitar), una capa de Sodio de 5 Km de profundidad se encuentra entre los 80 y 105 Km, hecha de átomos de Sodio no unidos y no ionizados; la capa de Sodio se irradia débilmente para contribuir al brillo del aire, esta banda se repone regularmente mediante la sublimación de Sodio de los meteoros entrantes, existen también en la región de la mesosfera superior/termosfera inferior otras capas de metal, como el Hierro y Potasio; en 2018, se identificó un tipo distinto de aurora, que se originó en la mesosfera (a menudo denominadas dunas debido a su parecido con las ondas de arena en una playa) las luces onduladas de color verde se extienden hacia el ecuador; se ha identificado que se originan a unos 96 Km sobre la superficie; dado que las auroras son causadas por partículas solares de ultra alta velocidad que interactúan con moléculas atmosféricas, el color verde de estas dunas se ha explicado por la interacción de esas partículas solares con moléculas de Oxígeno.

La mesosfera se encuentra por encima de los registros de altitud para las aeronaves, mientras que solo los Km más bajos son accesibles para los globos, para los cuales el registro de altitud es de 53 Km, y está por debajo de la altitud mínima para las naves espaciales orbitales debido a la alta resistencia atmosférica, solo se ha accedido a esta capa atmosférica mediante el uso de cohetes sonda que son capaces de tomar medidas mesosféricas durante unos minutos por misión; en esta capa atmosférica, como también ocurre en la estratosfera, por encima de las nubes de tormenta, se producen algunas emisiones particulares, con características diversas, que son denominadas colectivamente fenómenos luminosos transitorios, aunque se extienden decenas de Km, es imposible observarlos a simple vista, principalmente debido a su poca luminosidad. Sin embargo, cámaras instaladas en aviones, satélites o incluso en tierra, pero apuntadas a tormentas cercanas al horizonte, son capaces de probar la existencia de esos fenómenos; su origen se atribuye a la excitación de la electricidad por la variación del campo eléctrico, en particular durante la ocurrencia de un rayo de nube a tierra; entre los fenómenos transitorios más notables se encuentran los espectros, que aparecen inmediatamente por encima de los grandes rayos durante una tormenta eléctrica, por lo general mostrando colores rojizos y formas cilíndricas que se asemejan a tentáculos; los chorros azules, a su vez, aparecen en la parte superior de las grandes nubes de tormenta y se propagan en dirección vertical hasta unos 50 Km de altura (ambos tienen una duración máxima de unos pocos milisegundos), finalmente, los elfos (ELVES-Emission of Light and Very low-frequency perturbations from Electromagnetic pulse Sources) tienen forma de disco y duran unos pocos milisegundos, su origen puede deberse a la propagación de un pulso electromagnético generado en el momento de las descargas en la nube de abajo.

La mesosfera también es conocida por sus brillantes nubes de hielo azules, nubes mesosféricas noctilucentes o polares, llamadas así porque viven en la mesosfera y tienden a agruparse alrededor de los polos N y S; las nubes se forman en verano, cuando la mesosfera tiene los tres ingredientes para producir las nubes, temperaturas muy frias, vapor de agua y polvo de meteoritos que se queman en esta parte de la atmósfera; como las nubes son sensibles a la temperatura y al vapor de agua, son una señal útil de cambio en la mesosfera, en las últimas décadas, las nubes han llamado la atención de los científicos porque se comportan de manera extraña, se están volviendo más brillantes, alejándose más de los polos y apareciendo antes de lo habitual, las temperaturas más frías y el abundante vapor de agua están relacionados con el cambio climático en la atmósfera superior.

Los datos combinados de tres satélites de la NASA han producido un registro a largo plazo que revela que la mesosfera, se está enfriando y contrayéndose, en la mayoría de las altitudes, la mesosfera se enfrió a medida que aumentaba el dióxido de Carbono, ese efecto significó que la altura de cualquier presión atmosférica dada disminuyera a medida que el aire se enfriaba.

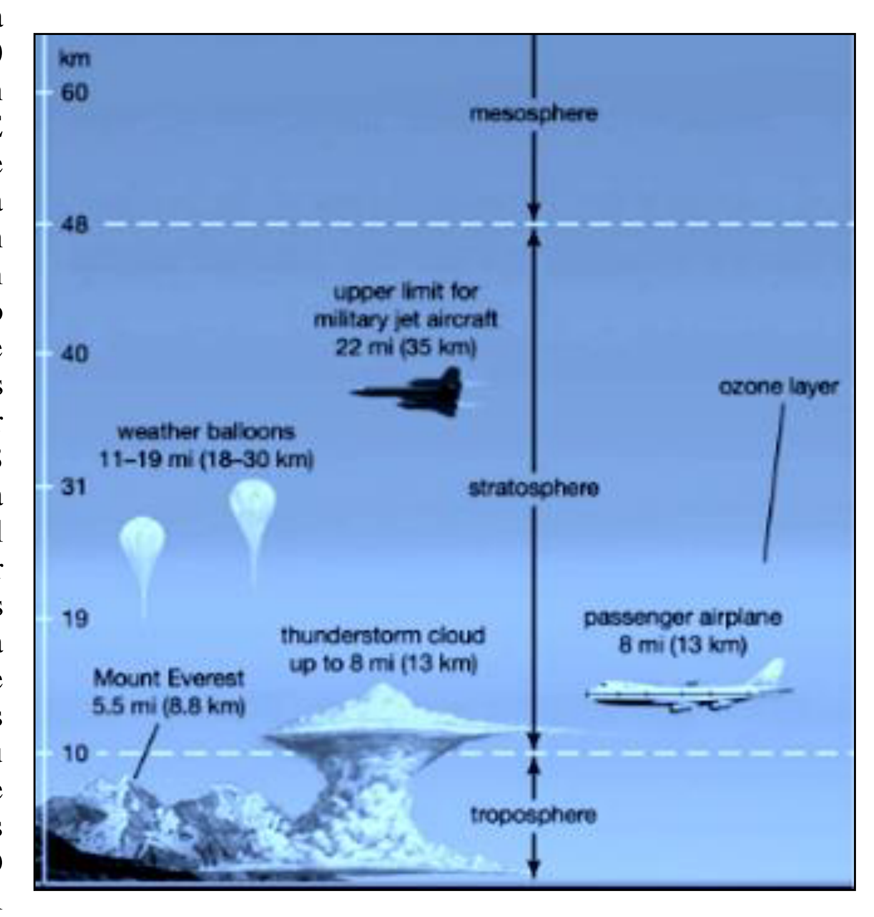


Estratosfera

Es la segunda capa más baja de la atmósfera terrestre, se encuentra por encima de la troposfera y está separada de ella por la tropopausa, esta capa se extiende desde la parte superior de la troposfera a alrededor de 12 Km sobre la superficie de la Tierra hasta la estratopausa a una altitud de aproximadamente 50 a 55 Km.

La presión atmosférica en la parte superior de la estratosfera es aproximadamente 1/1000 de la presión al nivel del mar, contiene la capa de ozono, que es la parte de la atmósfera terrestre que contiene concentraciones relativamente altas de ese gas; la estratosfera define una capa en la que las temperaturas aumentan al aumentar la altitud, el aumento de temperatura es causado por la absorción de la radiación UV del Sol por la capa de ozono, que restringe la turbulencia y la mezcla, aunque la temperatura puede ser de -60 °C en la tropopausa, la parte superior de la estratosfera es mucho más cálida y puede estar cerca de los 0 °C.

El perfil de temperatura estratosférica crea condiciones atmosféricas muy estables, por lo que la estratosfera carece de la turbulencia del aire que produce el clima que es tan frecuente en la troposfera. En consecuencia, la estratosfera está casi completamente libre de nubes y otras formas de clima. Sin embargo, ocasionalmente se observan nubes polares estratosféricas o nacaradas en la parte inferior de esta capa de la atmósfera donde el aire es más frío. La estratosfera es la capa más alta a la que se puede acceder mediante aviones a reacción.

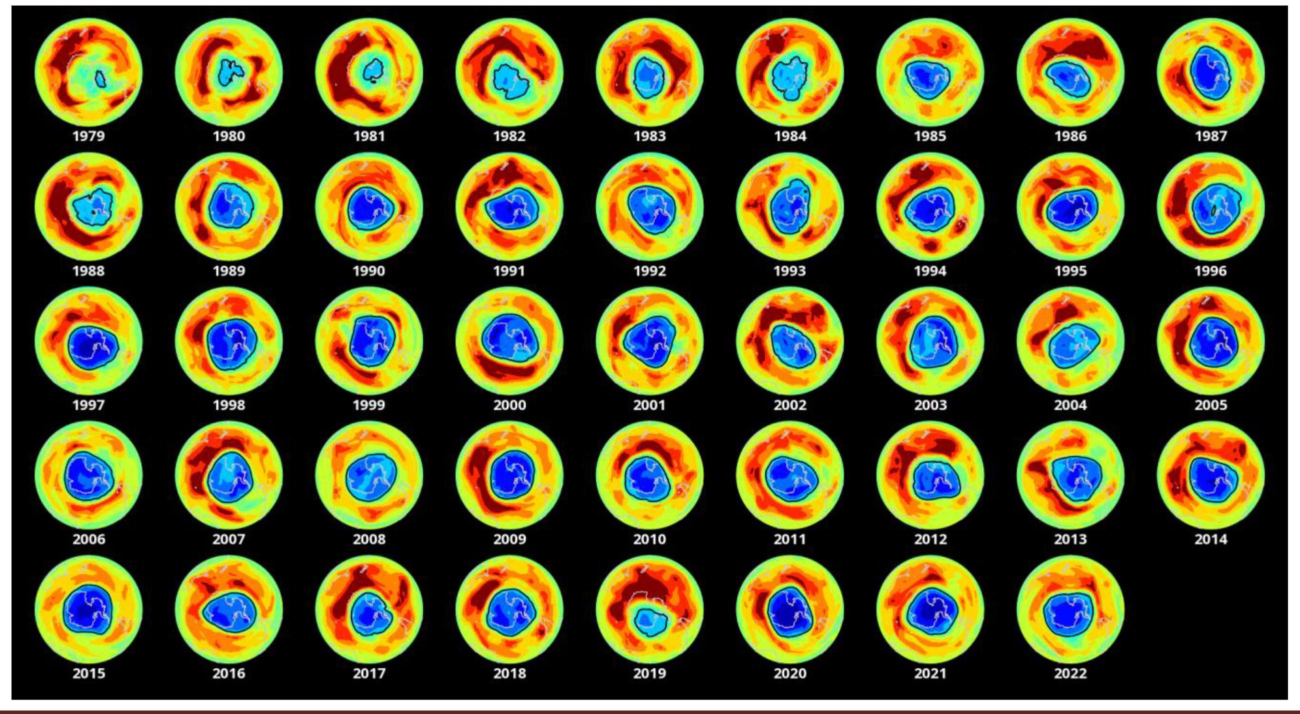


Los vientos en la estratosfera tropical, una capa atmosférica que se extiende entre 16 y 50 Km sobre la superficie de la Tierra, hacen circular el planeta en direcciones alternas de E y O durante aproximadamente un período de dos años; los vientos del O se desarrollan en la parte superior de la estratosfera y descienden gradualmente hasta el fondo, a unos 16 Km sobre la superficie, mientras que al mismo tiempo son reemplazados por una capa de vientos del E sobre ellos; a su vez, los vientos del E descienden y son reemplazados por vientos del O; este patrón se repite cada 28 meses. En la década de 1960, los científicos la denominaron oscilación cuasi bienal, el registro de estas mediciones, realizadas por globos meteorológicos lanzados en los trópicos en varios puntos del planeta, se remonta a 1953; el patrón nunca cambió, hasta finales de 2015, a medida que el año llegaba a su fin, los vientos del O se acercaban al final de su descenso típico; el patrón regular sostenía que los vientos más débiles del E pronto los reemplazarían, pero los vientos del O parecieron moverse hacia arriba y bloquear el movimiento descendente de los vientos del E; este nuevo patrón se mantuvo durante casi medio año y, en julio de 2016, el antiguo régimen parecía reanudarse; la oscilación cuasi bienal tiene una amplia influencia en las condiciones estratosféricas, la cantidad de ozono en el ecuador cambia en un 10 % entre los picos de las fases E y O, mientras que la oscilación también tiene un impacto en los niveles de agotamiento del ozono polar.

La capa de ozono está contenida dentro de la estratosfera, en esta capa, las concentraciones de ozono son aproximadamente de 2 a 8 ppm, que es mucho más alta que en la atmósfera inferior pero aún muy pequeña en comparación con los componentes principales de la atmósfera, se encuentra principalmente en la parte inferior de la estratosfera, de 15 a 35 Km, aunque el grosor varía estacionalmente y geográficamente, aproximadamente el 90 % del ozono de la atmósfera terrestre está contenido en la estratosfera.

La formación del ozono de la estratosfera terrestre es catalizada por los fotones de luz UV que al interaccionar con las moléculas de Oxígeno gaseoso, que están constituidas por dos átomos de Oxígeno (O_2) las separa en los átomos de Oxígeno (Oxígeno atómico) constituyente; el Oxígeno atómico se combina con aquellas moléculas de O_2 que aún permanecen sin disociar, formando, de esta manera, moléculas de ozono (O_3); el ozono actúa como filtro, o escudo protector, de las radiaciones nocivas, y de alta energía, que llegan a la Tierra, permitiendo que pasen otras como la UV de onda larga, que de esta forma llega a la superficie, esta radiación UV es la que permite la vida en el planeta, ya que es la que permite que se realice la fotosíntesis del reino vegetal, al margen de la capa de ozono, el 10 % de ozono restante está contenido en la troposfera, y es peligroso para los seres vivos por su fuerte carácter oxidante; elevadas concentraciones de este compuesto a nivel superficial forman el denominado smog fotoquímico; el origen de este ozono se explica en un 10 % como procedente del ozono transportado desde la estratosfera y el resto es creado a partir de diversos mecanismos, como el producido por las tormentas eléctricas que ionizan el aire y lo hace, muy brevemente, buen conductor de la electricidad, pueden verse ocasionalmente dos relámpagos consecutivos que siguen aproximadamente la misma trayectoria.

El seguimiento observacional de la capa de ozono, llevado a cabo en los últimos años, ha llegado a la conclusión de que dicha capa puede considerarse seriamente amenazada, para preservar la capa de ozono hay que disminuir a cero el uso de compuestos químicos como los clorofluorocarbonos (CFC) y fungicidas del suelo como el bromuro de metilo, que destruyen la capa de ozono a un ritmo 50 veces superior a los CFC; las últimas mediciones realizadas con satélites indican que el agujero en la capa de ozono se está reduciendo, a la vez que los niveles de CFC han disminuido, esos compuestos químicos dañan la capa de ozono de la atmósfera que protege nuestro planeta; durante más de 50 años, el número de CFC presentes en la parte alta de la atmósfera ha aumentado a un ritmo constante hasta el año 2000; desde entonces, la concentración de CFC se ha reducido a razón de casi un 1 % anual, y permite esperar que el agujero de la capa de ozono pueda cerrarse a mediados de siglo.



Troposfera

La troposfera está delimitada por encima de la tropopausa, un límite marcado en la mayoría de los lugares por una inversión de temperatura (una capa de aire relativamente caliente sobre una más fría) y en otros por una zona que es isotérmica con la altura.

Aunque ocurren variaciones, la temperatura generalmente disminuye con el aumento de la altitud porque la troposfera se calienta principalmente a través de la transferencia de energía desde la superficie, por tanto, la parte más baja de la troposfera (superficie de la Tierra) suele ser la sección más cálida de la troposfera, esto promueve la mezcla vertical; contiene aproximadamente el 80 % de la masa de la atmósfera terrestre, es más densa que todas las capas atmosféricas que la recubren porque un peso atmosférico mayor se asienta sobre la troposfera y hace que se comprima más severamente, el 50 % de la masa total de la atmósfera se encuentra en los 5,6 Km más bajos de la troposfera.

Casi todo el vapor de agua atmosférico o la humedad se encuentra en la troposfera, por lo que es la capa donde tiene lugar la mayor parte del tiempo de la Tierra, tiene básicamente todos los tipos de géneros de nubes asociados con el clima generados por la circulación activa del viento, aunque las nubes de trueno cumulonimbos muy altas pueden penetrar la tropopausa desde abajo y ascender hacia la parte inferior de la estratosfera; la mayor parte de la actividad de la aviación convencional tiene lugar en la troposfera, y es la única capa a la que se puede acceder mediante aviones propulsados por hélice.

La temperatura de la troposfera generalmente disminuye a medida que aumenta la altitud, la velocidad a la que disminuye la temperatura, se llama tasa de caída ambiental (ELR), no es más que la diferencia de temperatura entre la superficie y la tropopausa dividida por la altura; el ELR asume que el aire está perfectamente quieto, es decir, que no hay mezcla de las capas de aire de convección vertical, ni vientos que crearían turbulencias y, por tanto, mezcla de las capas de aire, la razón de esta diferencia de temperatura es que el suelo absorbe la mayor parte de la energía solar, que luego calienta los niveles más bajos de la atmósfera con la que está en contacto, mientras tanto, la radiación de calor en la parte superior de la atmósfera da como resultado el enfriamiento de esa parte de la atmósfera.

La troposfera se encuentra justo encima de la capa límite planetaria y es la capa en la que tienen lugar la mayoría de los fenómenos meteorológicos, contiene la capa límite y varía en altura desde un promedio de 9 Km en los polos hasta 17 Km en el Ecuador, en ausencia de inversiones y sin considerar la humedad, la tasa de caída de la temperatura para esta capa es de 6.5 °C/Km, una medición de las tasas de caída tanto de la troposfera como de la estratosfera ayuda a identificar la ubicación de la tropopausa, ya que la temperatura aumenta con la altura en la estratosfera y, por lo tanto, la tasa de caída se vuelve negativa, la ubicación de la tropopausa coincide con el punto más bajo en el que la tasa de caída cae por debajo de un umbral prescrito.

Debido a que la tropopausa responde a la temperatura promedio de toda la capa que se encuentra debajo de ella, está en sus niveles máximos sobre el ecuador y alcanza alturas mínimas sobre los polos, la capa más fría de la atmósfera se encuentra a unos 17 Km sobre el ecuador.

También es posible definir la tropopausa en términos de composición química, la estratosfera inferior tiene concentraciones de ozono mucho más altas que la troposfera superior, pero concentraciones de vapor de agua mucho más bajas, por lo que se pueden utilizar límites apropiados.

El ELR asume que la atmósfera está quieta, pero a medida que el aire se calienta, se vuelve flotante y se eleva, la tasa de caída adiabática seca explica el efecto de la expansión del aire seco a medida que se eleva en la atmósfera y las tasas de caída adiabática húmeda incluyen el efecto de la condensación del vapor de agua en la tasa de caída.

Cuando una porción de aire se eleva, se expande porque la presión es menor a mayor altitud, a medida que el paquete de aire se expande, empuja el aire circundante hacia afuera, transfiriendo energía en forma de trabajo desde ese paquete a la atmósfera, como la transferencia de energía a una parcela de aire a través del calor es muy lenta, se supone que no intercambia energía a través del calor con el medio ambiente. Tal proceso se llama proceso adiabático (sin transferencia de energía a través del calor) ya que la parcela de aire ascendente pierde energía a medida que trabaja en la atmósfera circundante y no se transfiere energía a ella como calor de la atmósfera; para compensar la pérdida, la parcela de aire pierde energía, lo que se manifiesta como una disminución en la temperatura del paquete de aire; si el aire contiene vapor de agua, el enfriamiento del aire puede hacer que el agua se condense y el comportamiento ya no es el de un gas ideal; si el aire está a la presión de vapor saturada, entonces la velocidad a la que la temperatura desciende con la altura se denomina velocidad de gradiente adiabático saturado; de manera más general, la tasa real a la que la temperatura desciende con la altitud se denomina tasa de caída ambiental; en la troposfera, el lapso medio ambiental es una caída de aproximadamente 6,5 °C por cada 1 Km de altura.

La troposfera se calienta desde abajo por el calor latente, la radiación de onda larga y el calor sensible; el exceso de calentamiento y expansión vertical de la troposfera se produce en los trópicos; en las latitudes medias, las temperaturas troposféricas disminuyen de un promedio de 15 °C al nivel del mar a aproximadamente -55 °C en la tropopausa, en los polos, la temperatura troposférica solo disminuye de un promedio de 0 °C al nivel del mar a aproximadamente -45 °C; en el ecuador, las temperaturas troposféricas disminuyen de un promedio de 20 °C al nivel del mar hasta aproximadamente -70 °C a -75 °C en la tropopausa; la troposfera es más delgada en los polos y más gruesa en el ecuador, el espesor promedio de la troposfera tropical es aproximadamente 7 Km mayor que el espesor promedio de la troposfera en los polos.

La capa límite planetaria es la parte de la troposfera que está más cercana a la superficie terrestre y se ve directamente afectada por ella, principalmente a través de la difusión turbulenta; durante el día, la capa límite planetaria suele estar mezclada, mientras que por la noche se estratifica de manera estable con una mezcla débil o intermitente; la profundidad de la capa límite planetaria varía desde unos 100 m en noches despejadas y tranquilas hasta 3000 m o más durante la tarde en regiones secas; la temperatura promedio de la atmósfera en la superficie terrestre es de 14 o 15 °C dependiendo de la referencia.

<u>Homosfera</u>

La homosfera de superficie incluye la troposfera, estratosfera, mesosfera y la parte más baja de la termosfera, donde la composición química de la atmósfera no depende del peso molecular porque los gases se mezclan por turbulencia; esta capa relativamente homogénea termina en la turbopausa que se encuentra a unos 100 Km, el borde mismo del espacio según lo aceptado por la Federación Aeronáutica Internacional, que lo coloca a unos 20 Km por encima de la mesopausa; por encima de esta altitud se encuentra la heterosfera, que incluye la exosfera y la mayor parte de la termosfera, aquí, la composición química varía con la altitud, esto se debe a que la distancia que las partículas pueden moverse sin chocar entre sí es grande en comparación con el tamaño de los movimientos que provocan la mezcla, permitiendo que los gases se estratifiquen por peso molecular con los más pesados como el Oxígeno y el Nitrógeno presentes solo cerca del fondo de la heterosfera; la parte superior de la heterosfera está compuesta casi en su totalidad por Hidrógeno (el elemento más ligero).

Rayos

El rayo, que está más comúnmente asociado con tormentas eléctricas, es un gigantesco arco eléctrico de electricidad estática por el que se forma un canal conductor y se transfieren cargas eléctricas; son varios los tipos de rayos que pueden ocurrir, en el interior de las propias nubes, entre dos nubes, entre una nube y el aire, y entre una nube y el suelo; los puntos de contacto de un rayo dependen de la forma en que se distribuyen las cargas eléctricas en el interior de las nubes; en general, la distribución de cargas en las nubes convectivas genera un campo eléctrico intenso; en la parte superior de la nube, que se aplana y se extiende horizontalmente, se acumulan las cargas positivas en pequeños cristales de hielo provenientes de las corrientes de convección; en el centro, generalmente en un rango de temperatura entre -20 y -10 °C, las cargas negativas están en sobreabundancia; los dipolos formados están separados unos de otros por unos pocos Km verticalmente; en la base de la nube se forma una pequeña región de cargas positivas, cuya carga es de solo de unos pocos culombios; en tormentas más desarrolladas, la distribución eléctrica es mucho más compleja.

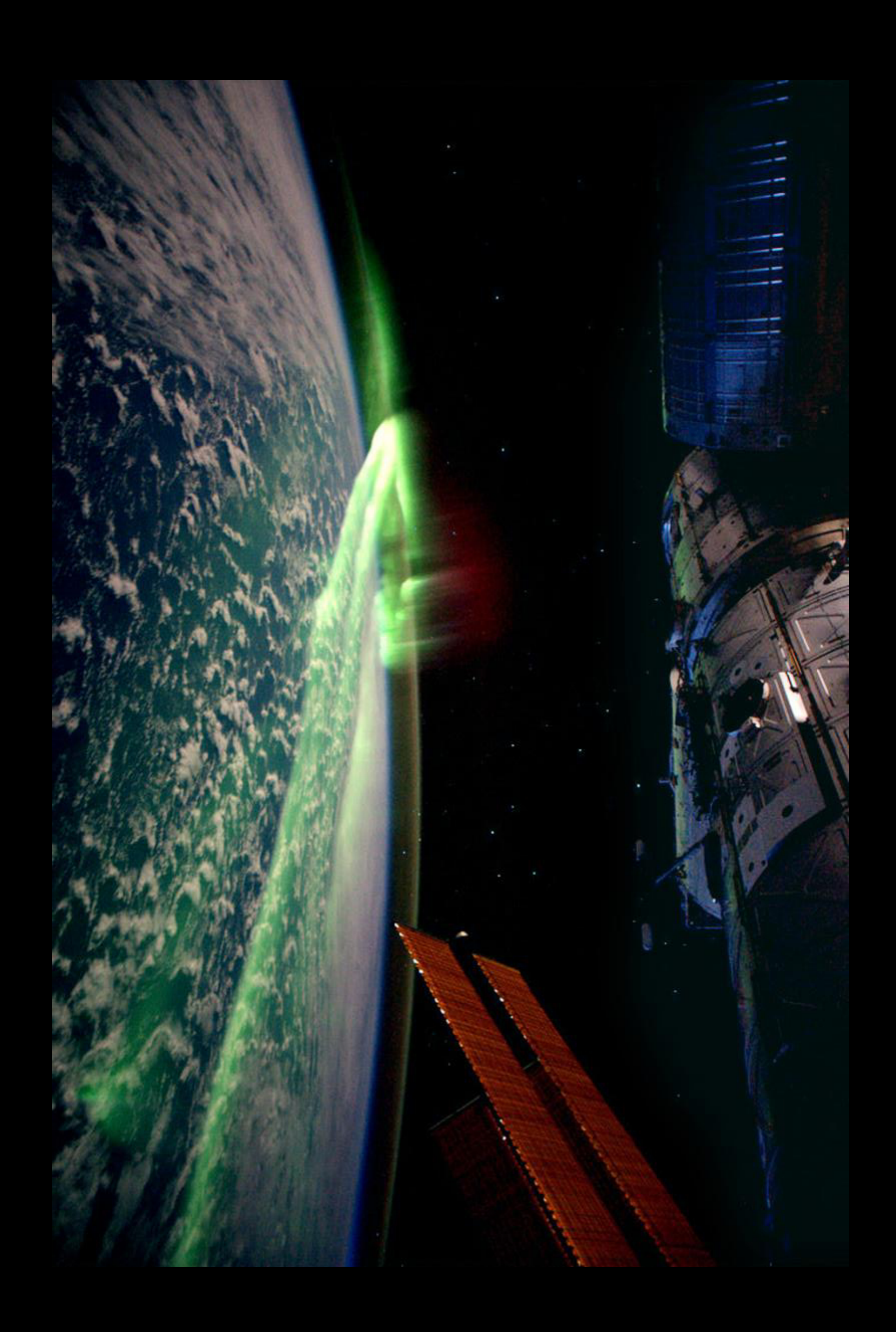
Los rayos suelen aparecer de manera intensa y brillante, a veces produciendo un efecto estroboscópico, la luminosidad de un rayo se puede ver a varias decenas de Km de distancia, este fenómeno se denomina relámpago de calor porque generalmente está asociado con las tormentas de verano.

Finalmente, las descargas intranubosas pueden manifestarse como canales extremadamente ramificados que se extienden horizontalmente en las regiones más altas de la nube, sobre una gran parte de ella, los rayos que se distribuyen horizontalmente generalmente parecen moverse más lentamente que la media; en las descargas de nube a tierra, es posible que se produzcan relámpagos de forma similar a una cinta, se debe a los fuertes vientos que pueden mover el canal ionizado.

En cada descarga, el rayo parece moverse lateralmente, formando segmentos paralelos entre sí; las descargas positivas, debido a que se originan en la parte más alta del cumulus, pueden extenderse más allá de la región de la tormenta, hacia un área donde el clima es estable, a Km de distancia, el canal de este tipo de rayos puede moverse horizontalmente durante unos Km antes de dirigirse repentinamente hacia el suelo.

Las descargas de todo tipo dejan un canal de aire ionizado extremadamente caliente a través del cual pasan, al cortar el flujo de cargas eléctricas, el canal restante se enfría rápidamente y se descompone en varias partes más pequeñas, creando una secuencia de puntos luminosos que desaparecen rápidamente, los segmentos se forman porque el canal no tiene un espesor constante en toda su longitud y las partes más gruesas tardan más en enfriarse, este fenómeno es extremadamente difícil de observar, porque todo el proceso toma solo una pequeña fracción de segundo; también se ha informado de un fenómeno llamado rayo globular, que tiene un diámetro medio de entre 20 y 50 cm, parece aparecer en tormentas, tiene un brillo menos intenso que otros rayos y generalmente se mueve horizontalmente en una dirección aleatoria, el fenómeno dura solo unos segundos.

Los rayos producen radiaciones en una amplia variedad de rangos en el espectro electromagnético, yendo desde las frecuencias ultrabajas hasta los rayos X y rayos γ, incluido el espectro visible; los rayos X y γ son de alta energía y resultan de la aceleración de los electrones en un campo eléctrico intenso en el momento de la descarga, son atenuados por la atmósfera, limitándose los rayos X en las proximidades del rayo, mientras que los rayos γ, aunque su intensidad se reduce considerablemente con la distancia, pueden detectarse tanto desde el suelo como desde satélites; las tormentas se asocian generalmente con la aparición de destellos de rayos γ en la atmósfera superior de la Tierra.



Atmósfera de la Luna

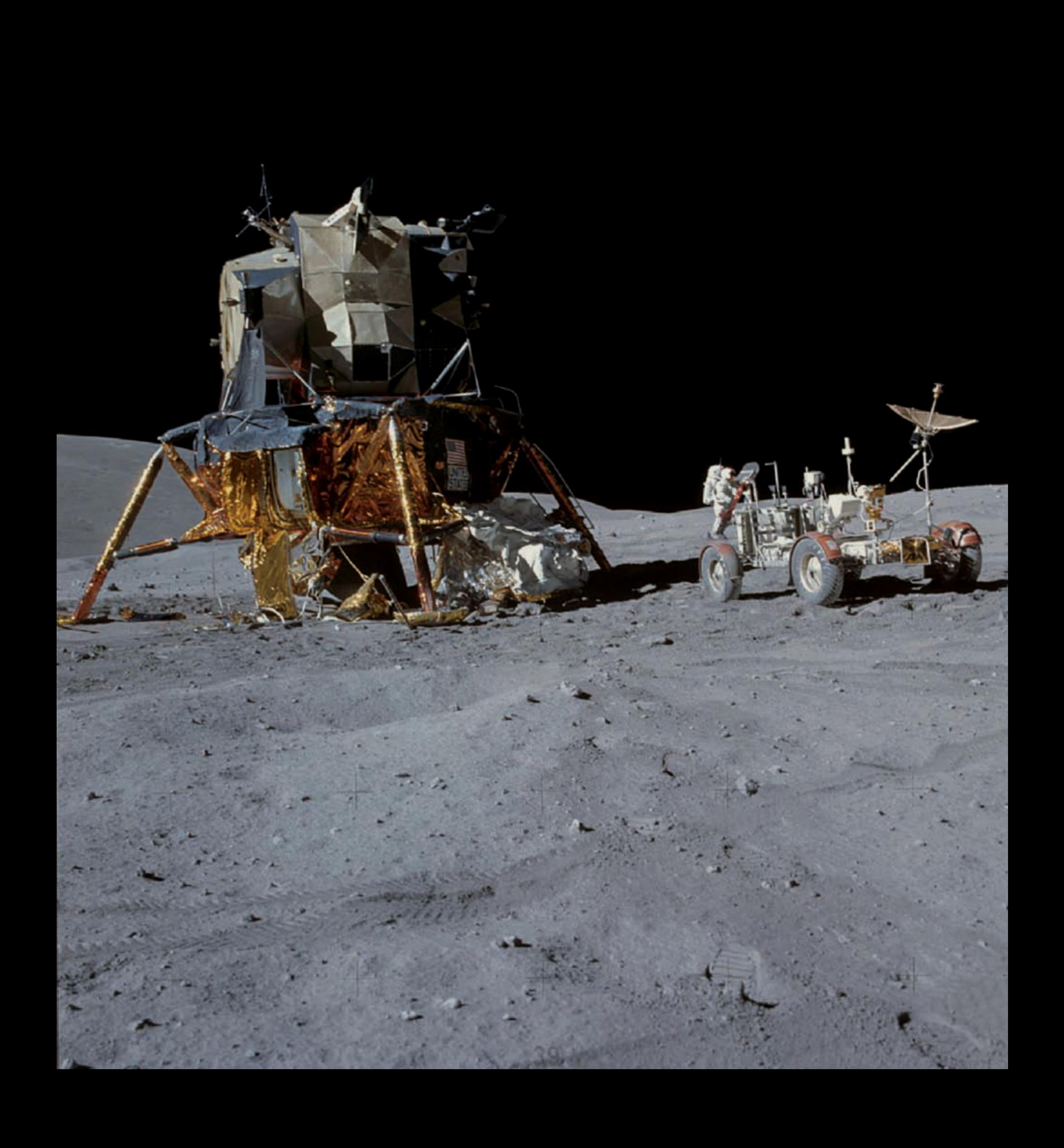
Cuanto más alta es la temperatura de un gas, más rápido se mueven sus átomos y moléculas; para el Nitrógeno y el Oxígeno, las velocidades de sus moléculas son 0,49 y 0,46 Km/seg, y para el vapor de agua y el dióxido de Carbono, 0,62 y 0,39 Km/seg; si la temperatura de un gas se eleva a 100 °C, la velocidad de sus moléculas aumentará casi un 20 % (la velocidad es promedio, de hecho, algunas moléculas se mueven más lento y otras más rápido); dado que las partículas de gas tienen diferentes velocidades, pueden abandonar el cuerpo celeste no solo cuando su velocidad promedio es mayor que la velocidad de escape (crítica), sino incluso si es la mitad de ella, el valor de la velocidad de algunas moléculas de Hidrógeno, Oxígeno y otros gases, incluso a temperatura moderada, es más de la mitad de la velocidad crítica lunar (es comprensible por qué la Luna no puede sostenerlos).

A pesar de que las moléculas escapan más rápido, la velocidad total de las moléculas de un gas a una temperatura dada sigue siendo la misma, debido al calor del exterior, recibido de la superficie del planeta o del Sol, otras moléculas pueden adquirir la segunda velocidad cósmica; partículas de gases que han alcanzado la segunda velocidad cósmica escaparán continuamente al espacio, y su lugar será ocupado por átomos y moléculas, que antes tenían una velocidad menor; los cálculos muestran que si la Luna tuviera una atmósfera compuesta por Hidrógeno o Helio, se disiparía en unos pocos días; el Oxígeno, Nitrógeno y el dióxido de Carbono a temperaturas diurnas en la Luna (130 °C) se evaporarían por completo en un tiempo relativamente corto; la teoría lleva a dos conclusiones muy importantes, la Luna probablemente nunca ha tenido una atmósfera similar a la de la Tierra; y, con su masa relativamente pequeña y baja gravedad, es imposible crear artificialmente una atmósfera similar a la terrestre; por lo tanto, la afirmación de que en el futuro la humanidad rodeará a la Luna con una atmósfera abierta debe considerarse insostenible, esto no es factible hasta que las personas encuentren formas de eludir las leyes de la gravitación universal y la teoría cinética de los gases.

Es posible que los exploradores lunares futuros puedan crear una atmósfera artificial temporal en la superficie lunar para aprender cómo cambia gradualmente su composición y cuánto tiempo la Luna puede contenerla, el peligro de contaminación de la atmósfera lunar (que puede dificultar la distinción entre sustancias inherentes a su naturaleza y sustancias introducidas desde el exterior) puede evitarse utilizando gases que serían inusuales para la Luna y que se evaporarían rápidamente de la atmósfera; tales experimentos solo serán posibles luego de un estudio exhaustivo de la envoltura gaseosa extremadamente débil de la Luna.

La superficie lunar, no protegida por la atmósfera, está continuamente expuesta a los rayos cósmicos primarios, rayos γ, rayos X, radiación UV y corpuscular del Sol, por lo que es radiactiva, las mediciones dosimétricas realizadas por los equipos de las naves Luna, Lunar Surveyor y Lunar Orbiter permitieron detectar el fondo de radiactividad causado por reacciones nucleares en el suelo de la Luna bajo la acción de los rayos cósmicos; durante un día lunar, que dura casi 15 días terrestres; los rayos del Sol, deslumbrantemente brillantes, sin retardo y sin dispersión, calientan el suelo lunar cerca del ecuador al mediodía a 130 °C; durante una noche lunar, el suelo se enfría hasta -160 °C, tal diferencia de temperatura se explica por la ausencia de una atmósfera y la gran capacidad de la superficie lunar para absorber la energía solar (refleja solo el 7 % de la luz solar que cae sobre ella).

Los ríos o mares no pueden existir en la superficie de la Luna; en el vacío, el agua no podría conservarse en ellos, la ausencia de aire y H_2O ha hecho de la Luna un mundo en el que la vida orgánica, similar a la terrestre, es imposible; la Luna es un mundo muerto, entregado al poder de las heladas más severas, calor feroz y silencio absoluto (el sonido se propaga debido a las vibraciones de las partículas de aire, que no están en la Luna) en lugar de un cielo azul, la Luna está envuelta en un velo oscuro salpicado de miríadas de estrellas luminosas y brillantes; la noche bruscamente, sin amanecer, es reemplazada por el día y, a la inversa, el día, sin crepúsculo vespertino, se convierte en noche de manera inmediata.

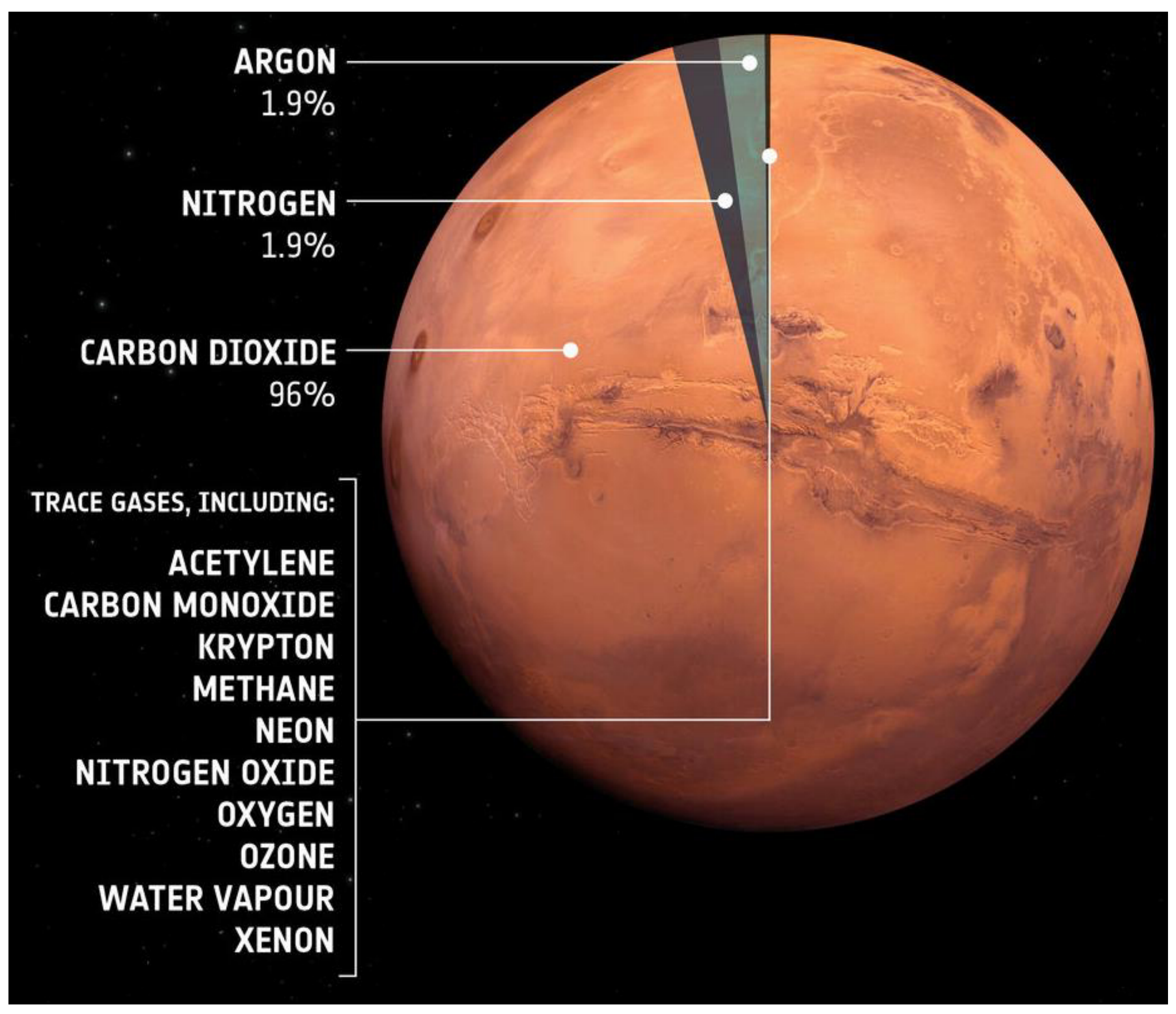


Atmósfera de Marte

En 1784, el astrónomo William Herschel publicó un artículo sobre sus observaciones de la atmósfera marciana y notó el movimiento ocasional de una región más brillante en Marte, que atribuyó a nubes y vapores, en 1809, el astrónomo Honoré Flaugergues escribió sobre su observación de nubes amarillas en Marte, que probablemente fueran tormentas de polvo; en 1864, William Dawes observó que el tinte rojizo del planeta no surgía de ninguna peculiaridad de su atmósfera; parecía estar completamente probado por el hecho de que el enrojecimiento era más profundo cerca del centro, donde la atmósfera es más delgada.

Observaciones espectroscópicas en las década de 1860 y 1870 llevaron a muchos a pensar que la atmósfera de Marte era similar a la terrestre. Sin embargo, en 1894, el análisis espectral y otras observaciones cualitativas de William Wallace Campbell sugirieron que Marte se parecía a la Luna, que no tiene una atmósfera apreciable; en 1926, observaciones fotográficas de W. Wright en el Observatorio Lick permitieron a Donald Menzel descubrir evidencia cuantitativa de la atmósfera de Marte.

Con una mejor comprensión de las propiedades ópticas de los gases atmosféricos y los avances en la tecnología de los espectrómetros, los científicos comenzaron a medir la composición atmosférica marciana, Lewis Kaplan y su equipo, detectaron las señales de vapor de H_2O y dióxido de Carbono en el espectrograma de Marte en 1964 , y en 1969 detectaron monóxido de Carbono.



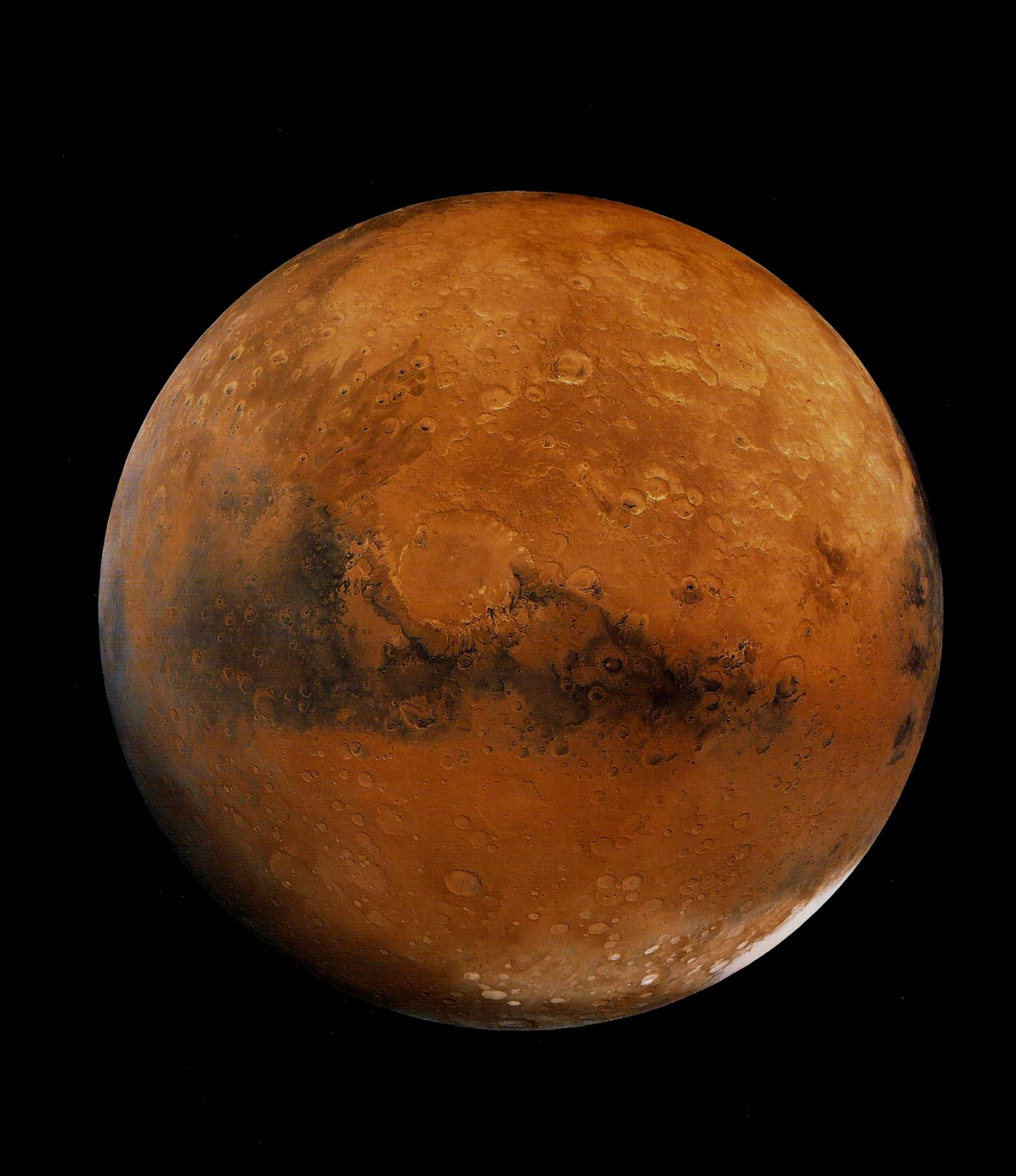
Si prescindimos de su composición sorprendentemente distinta, la atmósfera de Marte se comporta de manera similar a una versión enrarecida de la atmósfera terrestre, transporta agua, origina nubes y muestra variaciones diurnas y estacionales de los vientos; en respuesta a los cambios estacionales de la energía recibida del Sol, se producen tempestades de polvo localizadas, cuya intensidad aumenta a veces hasta recubrir la totalidad del planeta a escala global, tales tempestades de polvo constituyen a un fenómeno exclusivamente marciano, como resultado de la erosión atmosférica, la primitiva roca cristalina de Marte se ha disgregado en partículas finas, se ha oxidado y se ha combinado químicamente con agua para producir los minerales de color rojizo característico, que tan claramente se aprecian en las fotografías.

A consecuencia de la baja presión atmosférica y la baja temperatura reinante, las únicas formas estables de agua que allí se encuentran son vapor y hielo; pese a la ausencia de agua líquida en la actualidad, algunas fotografías hechas desde sondas en órbita demuestran claramente que la superficie del planeta ha experimentado en gran escala erosión debida a líquidos, pudo haber existido agua corriente en la superficie como consecuencia de la fusión o vaporización de masas de hielo subyacentes, también es posible que en alguna época el clima fuese mas templado y la atmósfera lo suficientemente densa y húmeda como para producir lluvia.

Anterior a las primeras naves que llegaron para investigar el planeta rojo, se creía, a partir de observaciones telescópicas, que la presión atmosférica en la superficie de Marte era de unos 85 mbar (valor algo inferior al 10% de la presión media en la superficie terrestre, que es de 1013 mbar), también se creía que el gas más abundante en la atmósfera marciana era el Nitrógeno; el dióxido de Carbono y el agua se habían identificado por medio del espectroscopio, pero se suponía que eran componentes secundarios porque ninguno de ellos se encontraba en abundancia suficiente para contribuir más que en una pequeña fracción a la presión total supuesta de 85 mb; aunque el Nitrógeno no se puede observar espectroscópicamente, parecía el componente principal más lógico en vista de su abundancia en la atmósfera terrestre.

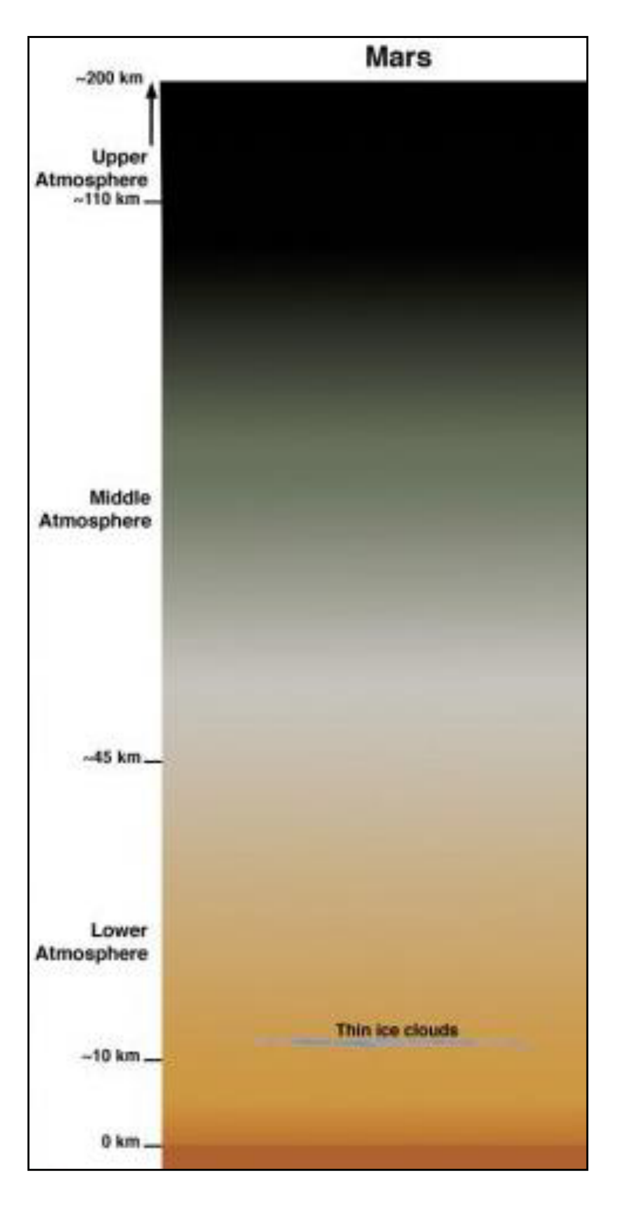
La presión en 85 mb se basaba en la intensidad y polarización de la luz solar reflejada, haciendo uso de ciertas hipótesis para separar los efectos de la luz reflejada por la superficie del planeta de los efectos de la luz difundida o reflejada por la atmósfera; actualmente se sabe que la fracción de la reflexión atribuida a los gases atmosféricos era exageradamente alta porque se dejó de tener en cuenta la gran cantidad de polvo y el clima que más tarde se demostró que existía; aunque la gravedad en la superficie de Marte sólo es el 38% de la de la Tierra, no hay en principio razón que impida que Marte pudiera retener una atmósfera con una presión casi tan alta como la de la Tierra; el Hidrógeno y el Helio son los únicos gases cuya energía cinética media en forma de agitación molecular térmica es más que suficiente para permitirles escapar de la fuerza gravitatoria.

Tanto en Marte como en la Tierra, la atmósfera está constituida por gases liberados del interior del planeta por el vulcanismo y otras formas de escape menos violentas; solamente una parte de los gases liberados, sin embargo, permanece en las dos atmósferas tal y como las observamos hoy; en la Tierra, la mayor parte de las sustancias volátiles liberadas están hoy en otros depósitos, el depósito de la mayor parte del vapor de agua liberado es, naturalmente, el océano, la mayor parte del dióxido de Carbono se encuentra atrapado en forma de carbonato cálcico en ciertas rocas, como las calizas, que se formaron en el fondo del océano, otros depósitos de Carbono, que originariamente escapó en forma de dióxido de Carbono, están representados por yacimientos de carbón, petróleo, esquistos petrolíferos y por Carbono disuelto en los océanos y dispersado en la biósfera, la cantidad de Carbono almacenada en forma de dióxido de Carbono en la atmósfera terrestre es insignificante.



La estructura de temperatura vertical de la atmósfera marciana difiere de la atmósfera terrestre en muchos aspectos; la información sobre la estructura vertical generalmente se infiere utilizando las observaciones de los sondeos IR térmicos, ocultación de radio, frenado aerodinámico y perfiles de reentrada de los lander, y se puede clasificar en tres capas según el perfil de temperatura promedio.

Troposfera



Es la capa donde se producen la mayoría de los fenómenos meteorológicos (convección y tormentas de polvo), su dinámica depende en gran medida del calentamiento diurno de la superficie y la cantidad de polvo suspendido; Marte tiene una altura de escala mayor de 11 Km que la Tierra (8,5 Km) debido a su gravedad más débil; la tasa de lapso adiabática seca teórica de Marte es 4.3 °C Km^{-1}, pero la tasa de lapso media medida es de alrededor de 2.5 °C Km^{-1} porque las partículas de polvo en suspensión absorben la radiación solar y calientan el aire; esta capa llega desde la superficie hasta los 40 Km de altura; la capa límite planetaria puede extenderse a más de 10 Km de espesor durante el día, el rango de temperatura diurna cerca de la superficie es enorme (60 °C) debido a la baja inercia térmica, en condiciones de mucho polvo, las partículas en suspensión pueden reducir el rango de temperatura diurna de la superficie a solo 5 °C, la temperatura por encima de los 15 Km se controla mediante procesos radiactivos en lugar de convección (Marte también es una rara excepción a la regla de la tropopausa de 0,1 bar que se encuentra en las otras atmósferas del Sistema Solar).

Mesosfera

Es la capa (40 a 100 Km) que tiene la temperatura más baja; el CO_2 en la mesosfera actúa como un agente de enfriamiento al irradiar calor de manera eficiente al espacio, observaciones de la ocultación estelar muestran que la mesopausa de Marte se sitúa a unos 100 Km, y tiene una temperatura de -173 a -153 °C (temperatura que a veces puede ser más baja que el punto de congelación del dióxido de Carbono) y se han informado detecciones de nubes de hielo de dióxido de Carbono.

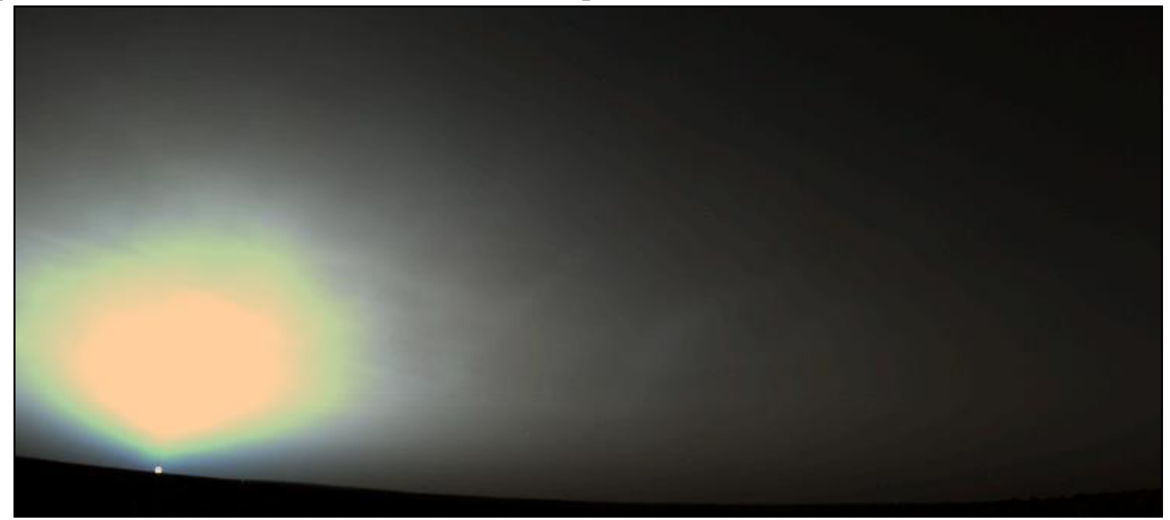
Termosfera

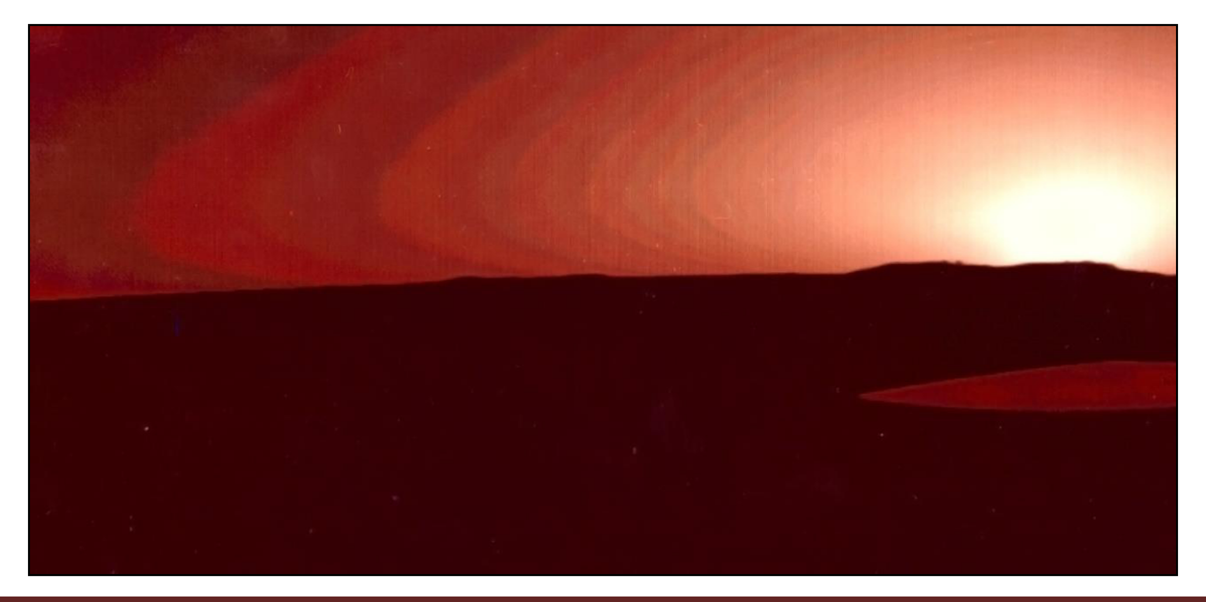
Esta capa atmosférica (100/230 Km) está controlada principalmente por un calentamiento UV extremo, la temperatura de la termosfera marciana aumenta con la altitud y varía según la estación, la temperatura diurna de la termosfera superior varía de -98 °C (en el afelio) a -33 °C (en el perihelio) y puede alcanzar hasta 116 °C, pero aún es significativamente más baja que la temperatura de la termosfera de la Tierra, la mayor concentración de dióxido de Carbono en la termosfera marciana puede explicar parte de la discrepancia debido a los efectos de enfriamiento del dióxido de Carbono a gran altitud; los procesos de calentamiento no son importantes en la termosfera marciana debido a la ausencia de un campo magnético fuerte en Marte, pero el orbitador MAVEN ha detectado varios eventos de auroras.

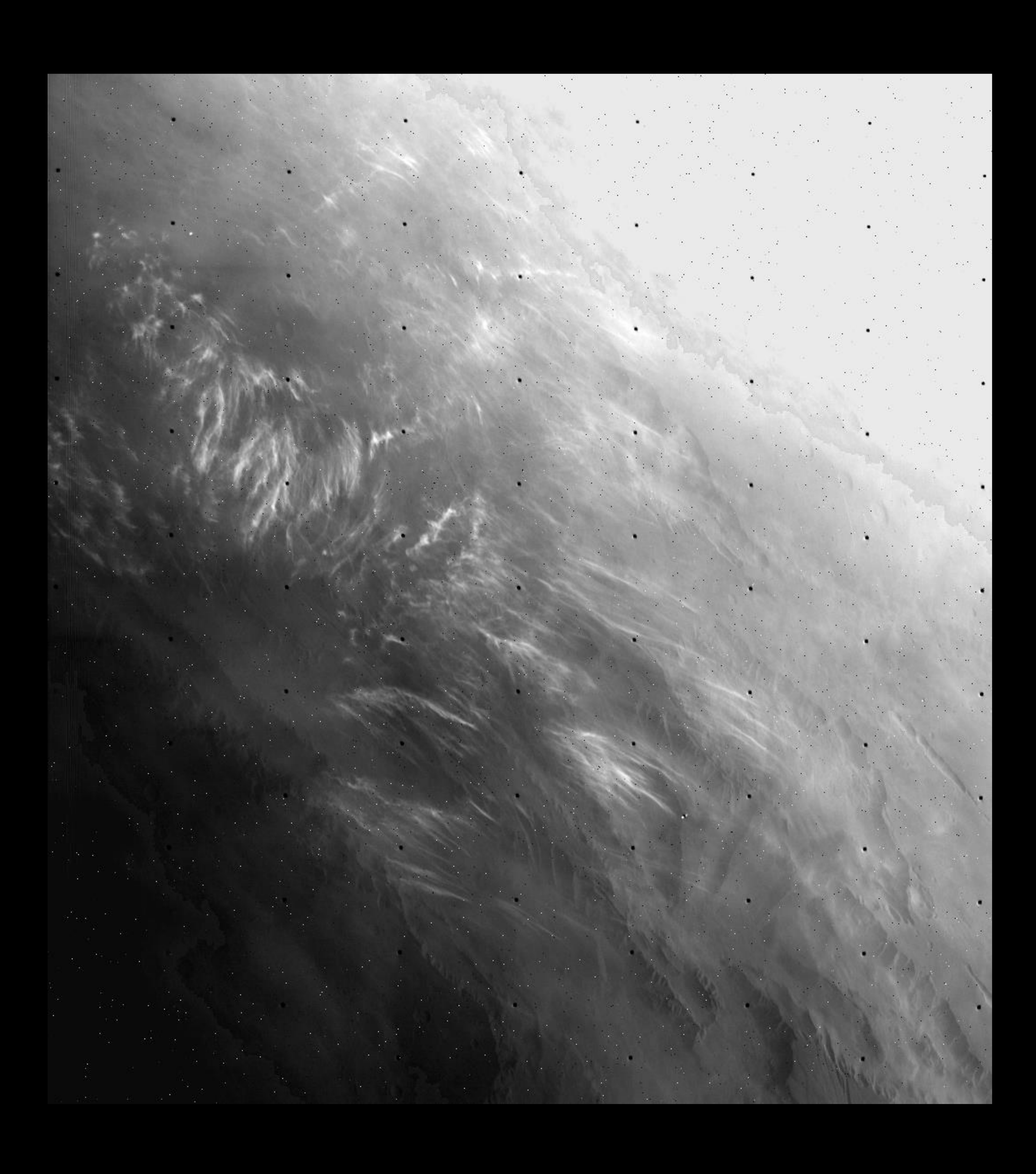
Marte no tiene una estratosfera persistente debido a la falta de especies absorbentes de onda corta en su atmósfera media para crear una inversión de temperatura. Sin embargo, se ha observado una capa de ozono estacional y una fuerte inversión de temperatura en la atmósfera media sobre el polo S marciano, la altitud de la turbopausa de Marte varía mucho de 60 a 140 Km, y la variabilidad es impulsada por la densidad del dióxido de Carbono en la termosfera inferior; Marte también tiene una ionosfera que interactúa con las partículas del viento solar, la radiación UV extrema, los rayos X del Sol y el campo magnético de su corteza; la Exosfera de Marte comienza a unos 230 Km y se fusiona gradualmente con el espacio interplanetario.

En 1965, las mediciones realizadas durante el sobrevuelo de la sonda Mariner 4 confirmaron que la atmósfera de Marte está constituida principalmente por dióxido de Carbono, y la presión superficial es de aproximadamente 400 a 700 Pascales; después de que se conoció la composición atmosférica de Marte, se iniciaron investigaciones en la Tierra para determinar la viabilidad de la vida en este planeta.

En 1976, las naves Viking 1 y 2 proporcionaron las primeras mediciones in situ de la composición atmosférica de Marte; el dióxido de Carbono es el componente principal de la atmósfera marciana, tiene una relación de volumen medio del 94,9%; en las regiones polares invernales, la temperatura de la superficie puede ser más baja que el punto de congelación del dióxido de Carbono, éste elemento en la atmósfera puede condensarse en la superficie para formar hielo seco sólido de 1 a 2 m de espesor.







En verano, la capa de hielo seco polar puede someterse a sublimación y liberar el dióxido de Carbono a la atmósfera, como resultado, se puede observar una variabilidad anual significativa en la presión atmosférica y la composición atmosférica en Marte; a pesar de la alta concentración de dióxido de Carbono en la atmósfera, el efecto invernadero es débil (alrededor de 5 °C) debido a la baja concentración de vapor de H_2O y la baja presión atmosférica; además, a baja presión atmosférica, los gases de efecto invernadero no pueden absorber la radiación IR de forma eficaz porque el efecto de ampliación de la presión es débil; en presencia de radiación solar UV (fotones con longitud de onda inferior a 225 nm); si no hay producción química de dióxido de Carbono, este elemento de la atmósfera actual se eliminaría mediante fotólisis en unos 3500 años; los radicales hidroxilo producidos a partir de la fotólisis del vapor de H_2O, junto con otras especies de Hidrógeno extrañas, pueden convertir el monóxido de Carbono de nuevo en dióxido de Carbono.

El Nitrógeno es el segundo gas más abundante en la atmósfera de Marte, tiene una relación de volumen medio del 2,6%; varias mediciones mostraron que la atmósfera está enriquecida en N_2 (el enriquecimiento de isótopos pesados de Nitrógeno posiblemente sea causado por procesos de escape selectivos de masas).

El Argón es el tercer gas más abundante en la atmósfera marciana, tiene una relación de volumen medio del 1,9%.; la relación de volumen medio estimada de Oxígeno molecular en la atmósfera marciana es de 0,174%, es uno de los productos de la fotólisis de dióxido de Carbono, vapor de agua y ozono; puede reaccionar con el Oxígeno atómico para volver a formar ozono; en el año 2010, el Observatorio Espacial Herschel detectó Oxígeno molecular en la atmósfera marciana.

El Oxígeno atómico se produce por fotólisis del dióxido de Carbono en la atmósfera superior y puede escapar de la atmósfera mediante recombinación disociativa o captación de iones, en 2016, el Observatorio Estratosférico de Astronomía IR (SOFIA) detectó Oxígeno atómico en la atmósfera marciana, que no se había encontrado durante las misiones Viking y Mariner en la década de 1970.

El metano es químicamente inestable en la actual atmósfera oxidante de Marte, se descompondría rápidamente debido a la radiación UV del Sol y las reacciones químicas con otros gases. Por tanto, una presencia persistente de metano en la atmósfera puede implicar la existencia de una fuente para reponer continuamente el gas, la nave de la ESA, Trace Gas Orbiter, realizó las mediciones más sensibles de metano en la atmósfera con más de 100 sondeos globales, no ha encontrado metano hasta un límite de detección de 0,05 ppb. Sin embargo, hubo otros informes de detección de metano por telescopios terrestres y el rover Curiosity, actualmente en la superficie marciana.

En 2003, un equipo del centro NASA/Goddard informó por primera vez de trazas de metano, al nivel de varios ppb, en la atmósfera; se midieron grandes diferencias en las abundancias entre las observaciones tomadas en 2003 y 2006, lo que sugirió que el metano estaba concentrado localmente y probablemente estacional; en 2014, la NASA informó que el rover Curiosity detectó metano en la atmósfera a su alrededor a finales de 2013 y principios de 2014, mediciones tomadas durante dos meses en este período promediaron 7,2 ppb, lo que implica que Marte es episódicamente productor o liberador de metano desde una fuente desconocida.

Los principales candidatos para el origen del metano de Marte incluyen procesos no biológicos como reacciones agua-roca, radiólisis del H_2O y formación de pirita, todos los cuales producen Hidrógeno que luego podría generar metano y otros hidrocarburos; también se ha demostrado que el metano podría producirse mediante un proceso que involucra al H_2O, dióxido de carbono y el mineral olivino, que se sabe es común en Marte; microorganismos de tipo extremófilos como los metanógenos, son otra posible fuente, pero no se ha encontrado evidencia de presencia de tales organismos en Marte; existen algunas sospechas sobre la detección de metano, lo que sugiere que, puede ser probablemente causado por la contaminación terrestre indocumentada de los rovers o una mala interpretación de los datos de medición.

Similar al ozono estratosférico en la atmósfera terrestre, el ozono presente en la atmósfera de Marte puede ser destruido por ciclos catalíticos que involucran especies de Hidrógeno extrañas, dado que el H_2O es una fuente importante de estas extrañas especies de Hidrógeno, generalmente se observa una mayor abundancia de ozono en las regiones con menor contenido de vapor de H_2O; las mediciones mostraron que la columna total de ozono puede alcanzar de 2 a 30 μm-atm alrededor de los polos en invierno y primavera, donde el aire es frío y tiene una baja tasa de saturación de H_2O; las nubes de hielo de dióxido de Carbono pueden formarse en las regiones polares de invierno y a gran altura en las regiones tropicales, donde la temperatura del aire es más baja que el punto de congelación del dióxido de Carbono.

Las reacciones reales entre el ozono y las especies de Hidrógeno extrañas pueden complicarse aún más por las reacciones heterogéneas que tienen lugar en las nubes de H_2O helada; se cree que la distribución vertical y la estacionalidad del ozono en la atmósfera marciana está impulsada por las complejas interacciones entre la química y el transporte; el espectrómetro UV/IR de la sonda Mars Express mostró la presencia de dos capas de ozono distintas en latitudes bajas a medias, estos comprenden una capa persistente cercana a la superficie por debajo de una altitud de 30 Km, una capa separada que solo está presente en la primavera y el verano del N con una altitud de 30/60 Km, y otra capa separada que existe de 40/60 Km por encima del polo S en invierno, sin contraparte por encima del polo N de Marte.



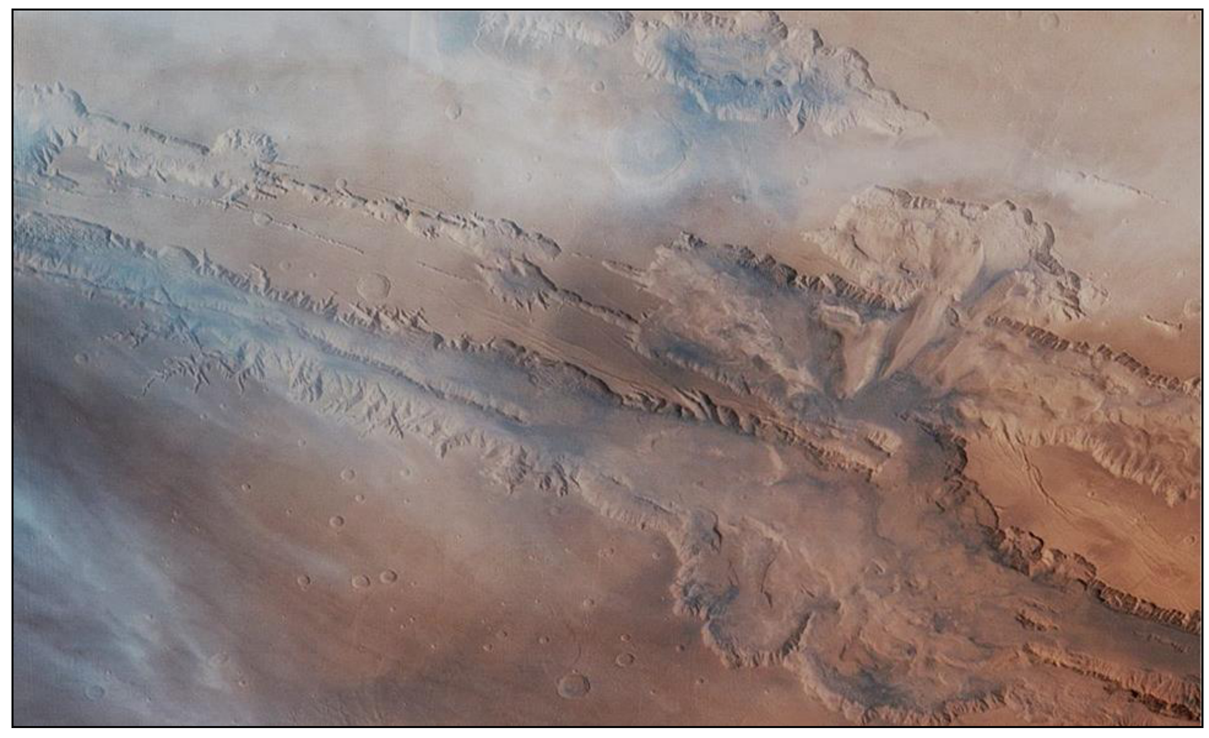
Noctis Labyrinthus (Viking 1)

Esta tercera capa de ozono muestra una abrupta disminución en la elevación entre 75 y 50° S; la sonda Mars Express detectó un aumento gradual en la concentración de ozono a 50 Km hasta mediados del invierno, después de lo cual disminuyó lentamente a concentraciones muy bajas, sin capa detectable por encima de los 35 Km.

El vapor de agua (H_2O) es un gas traza en la atmósfera marciana y tiene una enorme variabilidad espacial, diurna y estacional, las mediciones realizadas por la nave Viking a fines de la década de 1970 sugirieron que la masa total global de vapor de H_2O es equivalente a aproximadamente 1 a 2 Km^3 de hielo, mediciones recientes realizadas por la sonda Mars Express mostraron que la abundancia de columna de vapor de H_2O promediada anualmente a 10-20 micrones precipitables (pr. Mm), la abundancia máxima de vapor de H_2O (50-70 pr. Mm) se encuentra en las regiones polares del N a principios del verano debido a la sublimación del hielo de agua en el casquete polar.

A diferencia de la atmósfera terrestre, las nubes de agua líquida no pueden existir en la atmósfera de Marte debido a la baja presión atmosférica; las cámaras del rover Opportunity, la nave Phoenix Mars, y las sondas Viking en órbita, han observado nubes de hielo de H_2O similares a cirros; mediciones realizadas por la nave Phoenix Mars mostraron que las nubes de hielo pueden formarse en la parte superior de la capa límite planetaria durante la noche y precipitarse como cristales de hielo en la región polar N.

Bajo un viento suficientemente fuerte las partículas de polvo pueden movilizarse y elevarse desde la superficie a la atmósfera; algunas de las partículas de polvo se pueden suspender en la atmósfera y viajar por circulación antes de caer de nuevo al suelo, estas partículas pueden atenuar la radiación solar e interactuar con la radiación IR, lo que puede provocar un efecto radiactivo significativo en Marte, las mediciones sugirieron que la profundidad óptica del polvo promediada globalmente tiene un nivel de fondo de 0,15 y alcanza su punto máximo en la temporada de primavera y verano del S; la abundancia local de polvo varía mucho según las estaciones y los años; durante los eventos globales de polvo, los activos de la superficie de Marte pueden observar una profundidad óptica superior a 4; mediciones de la superficie también mostraron que el radio efectivo de las partículas de polvo varía de 0,6 µm a 2 µm y tiene una estacionalidad considerable; el polvo tiene una distribución vertical desigual en Marte, los datos de sondeo mostraron que hay otros picos de proporción de mezcla de polvo a mayor altitud (15-30 Km sobre la superficie).



Como especie volcánica y biogénica, el metano es de interés para muchos geólogos y astrobiólogos. Sin embargo, el metano es químicamente inestable en una atmósfera oxidante con radiación UV; la vida útil del metano en la atmósfera marciana es de unos 400 años; la detección de metano en una atmósfera planetaria puede indicar la presencia de actividades geológicas recientes u organismos vivos; desde 2004, se han reportado trazas de metano (rango de 60 ppb por debajo del límite de detección de <0.05 ppb en varias misiones y estudios de observación; la fuente de metano en Marte y la explicación de la enorme discrepancia en las concentraciones de metano observadas todavía están bajo un debate activo.

El dióxido de Azufre en la atmósfera sería un indicador de la actividad volcánica actual; si los volcanes han estado activos en la historia marciana reciente, se esperaría encontrar dióxido de Azufre junto con metano en la atmósfera marciana, no se lo ha detectado en la atmósfera, con un límite superior de sensibilidad establecido en 0,2 ppb. Sin embargo, un equipo dirigido por científicos del Centro NASA/Goddard informó la detección de este elemento en muestras de suelo analizadas por el rover Curiosity en 2013.

El monóxido de carbono es producido por la fotólisis del dióxido de Carbono y reacciona rápidamente con los oxidantes en la atmósfera marciana para volver a formar dióxido de Carbono; la relación de volumen medio estimada de Carbono en la atmósfera marciana es de 0,07%.

La concentración de Helio, Neón, Criptón y Xenón en la atmósfera marciana se ha medido mediante diferentes misiones; las proporciones isotópicas de los gases nobles revelan información sobre las primeras actividades geológicas en Marte y la evolución de su atmósfera; el Hidrógeno molecular (H_2) se produce por la reacción entre especies de Hidrógeno impares en la atmósfera media, puede llegar a la atmósfera superior mediante mezcla o difusión, descomponerse en Hidrógeno atómico por radiación solar y escapar de la atmósfera marciana, se calcula que la proporción de mezcla de H_2 en la atmósfera inferior es de aproximadamente 15±5 ppm.

En general, los gases que se encuentran en Marte se reducen en isótopos estables más ligeros, lo que indica que la atmósfera marciana ha cambiado por algunos procesos seleccionados en masa a lo largo de su historia. Los científicos a menudo se basan en estas mediciones de la composición de isótopos para reconstruir las condiciones de la atmósfera marciana en el pasado.

El escape hidrodinámico en la historia temprana de Marte puede explicar el fraccionamiento isotópico de Argón y Xenón, la atmósfera no está filtrando estos dos gases nobles al espacio exterior debido a su masa más pesada. Sin embargo, la mayor abundancia de Hidrógeno en la atmósfera marciana y los altos flujos de rayos UV extremos del Sol, juntos, podrían haber provocado una salida hidrodinámica y arrastrado estos gases pesados.

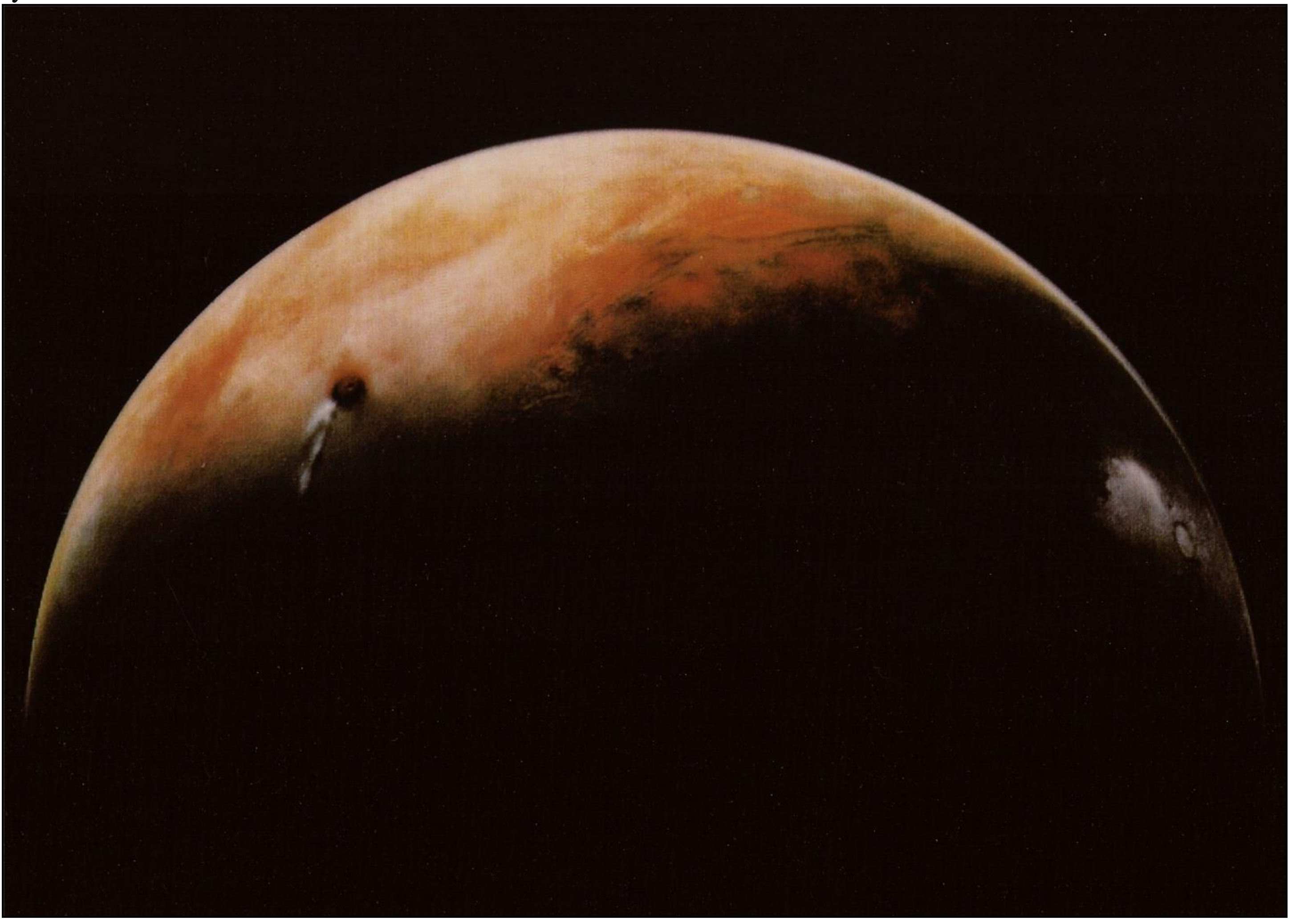
La atmósfera marciana es particularmente propensa a la erosión por impacto debido a la baja velocidad de escape de Marte, un estudio sugirió que Marte podría haber perdido el 99% de su atmósfera inicial al final del período tardío de bombardeos intensos sobre la base de un flujo de bombardeo hipotético estimado a partir de la densidad de los cráteres lunares.

Una de las formas de estimar la cantidad de agua perdida por el escape de Hidrógeno en la atmósfera superior es examinar el enriquecimiento de Deuterio sobre el Hidrógeno; estudios basados en isótopos estiman que en la historia de Marte se ha perdido en el espacio una capa de agua a través del escape de Hidrógeno, observando que el enfoque basado en el escape atmosférico solo proporciona el límite inferior para el inventario de agua estimado.

Para explicar la coexistencia del agua líquida y el débil Sol durante la historia temprana de Marte, debe haber ocurrido un efecto invernadero mucho más fuerte en la atmósfera marciana para calentar la superficie por encima del punto de congelación del agua; el astrónomo Carl Sagan propuso que una atmósfera de 1 bar y el sulfato podía producir suficiente calentamiento para Marte; el Hidrógeno podría ser producido por la vigorosa desgasificación de un manto marciano temprano altamente reducido y la presencia de dióxido de Carbono y vapor de agua podría reducir la abundancia requerida de dihidrógeno para generar tal efecto invernadero. Sin embargo, el modelado fotoquímico mostró que mantener una atmósfera con este alto nivel de H_2 es difícil, el sulfato también ha sido uno de los gases de efecto invernadero efectivos propuestos en la historia temprana de Marte, otros estudios sugirieron que la alta solubilidad del sulfato, la formación eficiente de aerosol de ácido sulfúrico y la deposición en la superficie prohíben la acumulación a largo plazo de sulfato en la atmósfera marciana, y por lo tanto reducen el potencial efecto de calentamiento del sulfato.

Descargas eléctricas

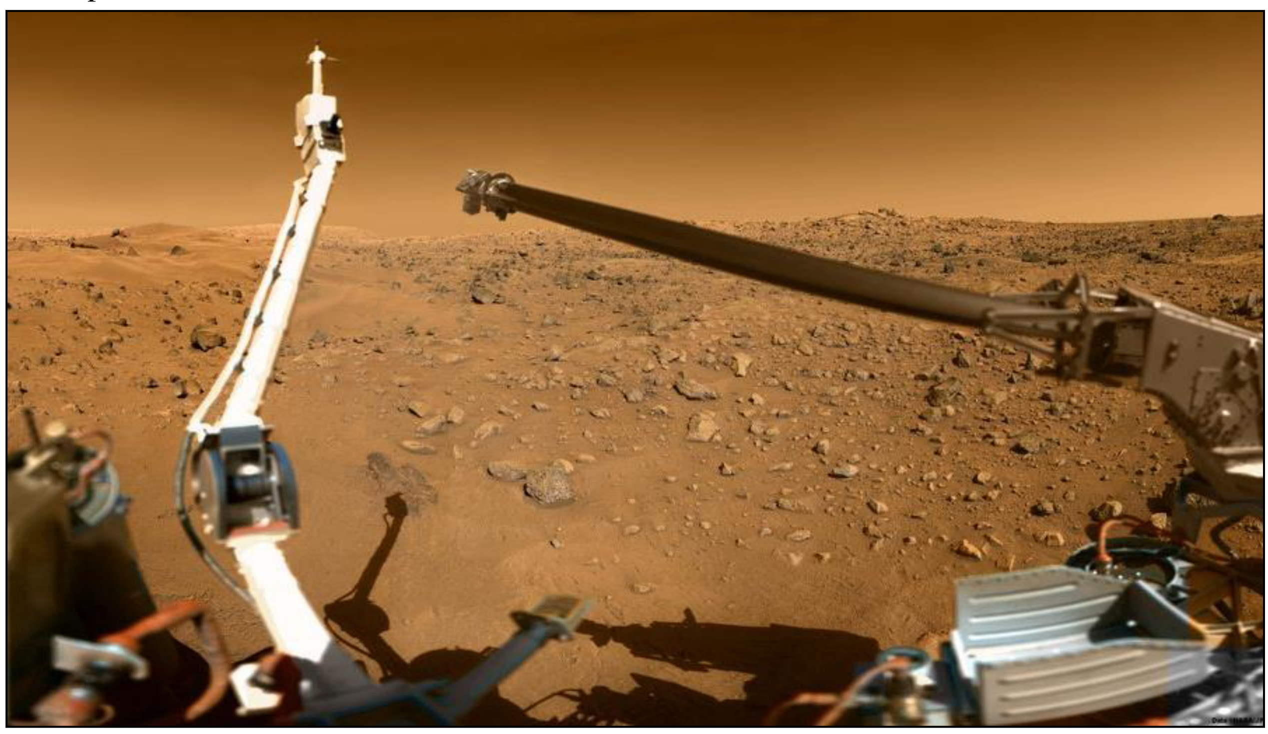
En 2009, un estudio de observación basado en la Tierra informó la detección de eventos de descarga eléctrica a gran escala en Marte y propuso que están relacionados con la descarga de rayos en las tormentas de polvo. Sin embargo, estudios de observación posteriores mostraron que el resultado no es reproducible utilizando el receptor de radar en la sonda Mars Express y el Telescopio Allen con base en la Tierra; un estudio de laboratorio mostró que la presión del aire en Marte no es favorable para cargar los granos de polvo y, por lo tanto, es difícil generar rayos en la atmósfera marciana.



Vientos

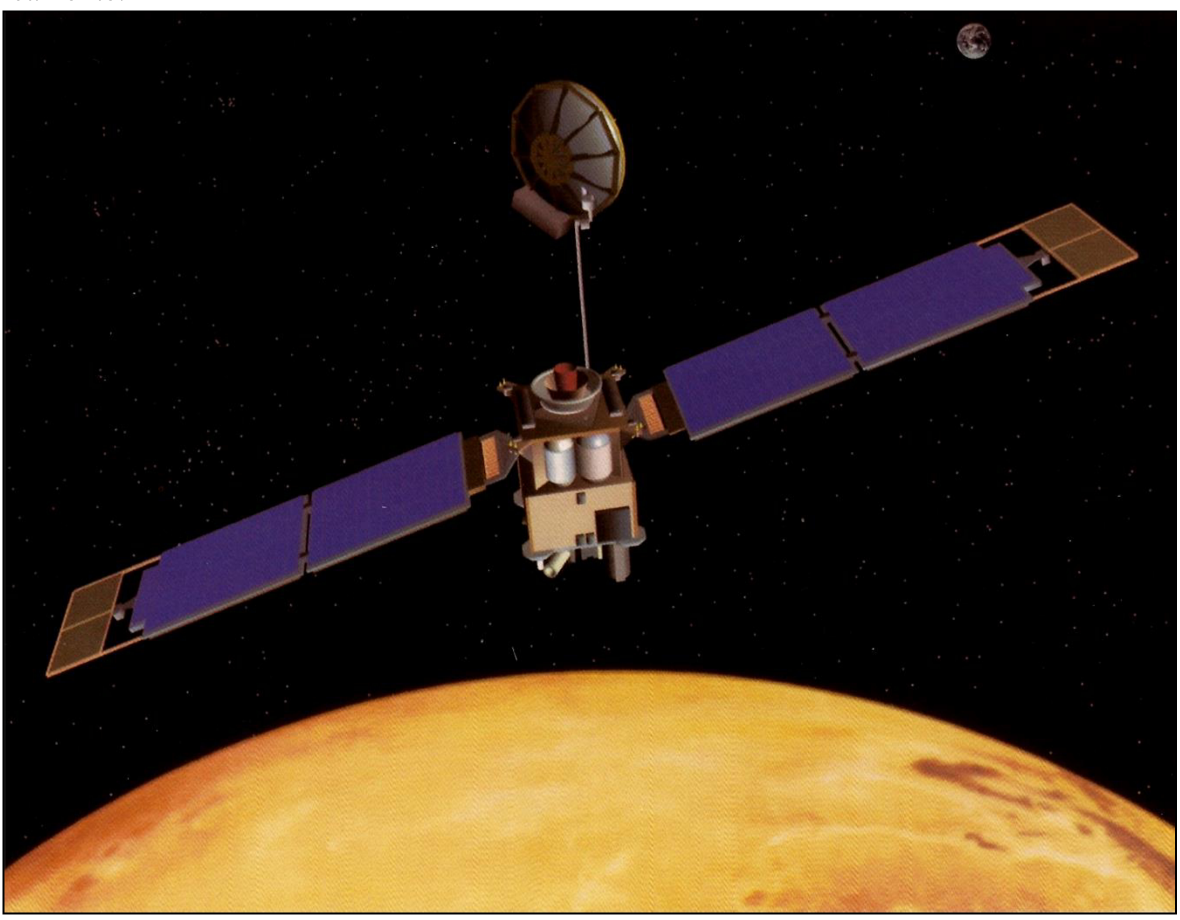
A mediados de la década de 1970, llegaría al planeta Marte dos naves, Viking1 y Viking 2, misiones que se dividirían en dos partes por un lado un orbitador, cuyo objetivo era el de cartografiar el planeta con una resolución de 200 m; además de las recurrentes tormentas de polvo; cada sonda llevaba no sólo un conjunto de experimentos para detectar posibles formas de vida en la superficie marciana, sino también instrumentos para estudiar las propiedades químicas, magnéticas, aparentes y físicas de la superficie y atmósfera, por otro lado, cada misión llevaría un módulo de aterrizaje (lander) cuyo objetivo principal sería el de fotografiar y estudiar la superficie, como también realizar observaciones meteorológicas y sísmicas.

El lander tenía una pequeña estación meteorológica sostenida por un mástil de 1 m estaba compuesta por tres sensores térmicos distribuidos en altura, un manómetro y un anemómetro que permitía medir tanto la velocidad como la dirección del viento, estas mediciones adquiridas durante más de 3 años marcianos constituyeron una base de datos única para el estudio del clima de Marte.



El lander Viking 1 midió vientos en la superficie con ráfagas de hasta 108 Km/h durante el paso de una tormenta de polvo, lo que sugiere que esta es la velocidad mínima del viento necesario para iniciar el levantamiento del mismo. Sin embargo, el proceso de elevación del polvo es complicado y el umbral de elevación puede variar dependiendo de las propiedades de la superficie y la estabilidad atmosférica; cada año marciano se producen numerosas tormentas de polvo y generalmente se clasifican según su tamaño, desde el más pequeño al más grande, son, remolinos de polvo, tormentas locales, tormentas regionales y tormentas que rodean el planeta; en general, las tormentas más pequeñas tienen vidas más cortas y ocurren con mucha más frecuencia que las tormentas más grandes, los remolinos de polvo, ocurren a diario y duran de minutos a horas, suelen tener decenas de metros de diámetro y varios kilómetros de altura, algunos han sido observados a alrededor de 8 Km de altura; generalmente se forman sobre terreno liso varias horas después del mediodía local; desde la superficie, han sido detectados mediante datos meteorológicos e imágenes de cámaras; desde órbita, estos sistemas han sido detectados por las sombras que producen y por las estelas que dejan en la superficie. Se cree que los remolinos de polvo contribuyen de manera importante a la carga de polvo atmosférico marciano; las tormentas que rodean el planeta ocurren casi cada año y pueden durar meses.

Las tormentas de polvo locales son bastante comunes; según imágenes de la sonda Mars Global Surveyor, cada año marciano se producen hasta 2000 tormentas locales (2 a 3 tormentas por día marciano) tienen una vida útil típica de menos de varios días y tienden a formarse a lo largo del borde de los casquetes polares y en las latitudes medias de ambos hemisferios, estos sistemas suelen tener una morfología convectiva distinta y pueden ser bastante gruesos ópticamente.



Se observaron tormentas regionales en casi todas las estaciones, pero son más frecuentes durante la primavera y el verano, la mayoría se desarrollan dentro de ±30° de latitud, aunque hay una clara tendencia hacia el hemisferio S, pueden durar desde días hasta semanas; estas tormentas pueden desplazarse a una distancia significativa de su ubicación original y pueden desarrollarse nuevas tormentas satélite que estén bastante alejadas del centro original.

Las tormentas que rodean el planeta son las menos frecuentes pero las más espectaculares de las tormentas de polvo marcianas, esparcen polvo por todas las longitudes y la mayoría de las latitudes hasta alturas superiores a los 50 Km, generalmente comienzan en el hemisferio S durante la primavera y el verano australes; no se ha observado ninguna en otras temporadas; comienzan como tormentas regionales y luego se expanden en longitud y latitud.

Los mecanismos responsables de las tormentas de polvo marcianas no se conocen bien, los remolinos de polvo probablemente estén relacionados con un fuerte calentamiento convectivo diurno, como ocurre en la Tierra. Sin embargo, en el caso de las tormentas grandes, los efectos de retroalimentación radiactiva deben ser importantes; las partículas de polvo marciano suspendidas interactúan eficientemente con la luz solar, así, a medida que aumenta la carga de polvo, también aumenta el calentamiento directo in situ de la atmósfera, esto intensifica la circulación, lo que levanta más polvo; esta retroalimentación positiva continúa hasta que se agota el suministro de partículas de polvo móviles en la superficie, o hasta que la carga de polvo llega a ser tan alta que la atmósfera se estabiliza y se suprime una mayor elevación.

Sonda MAVEN

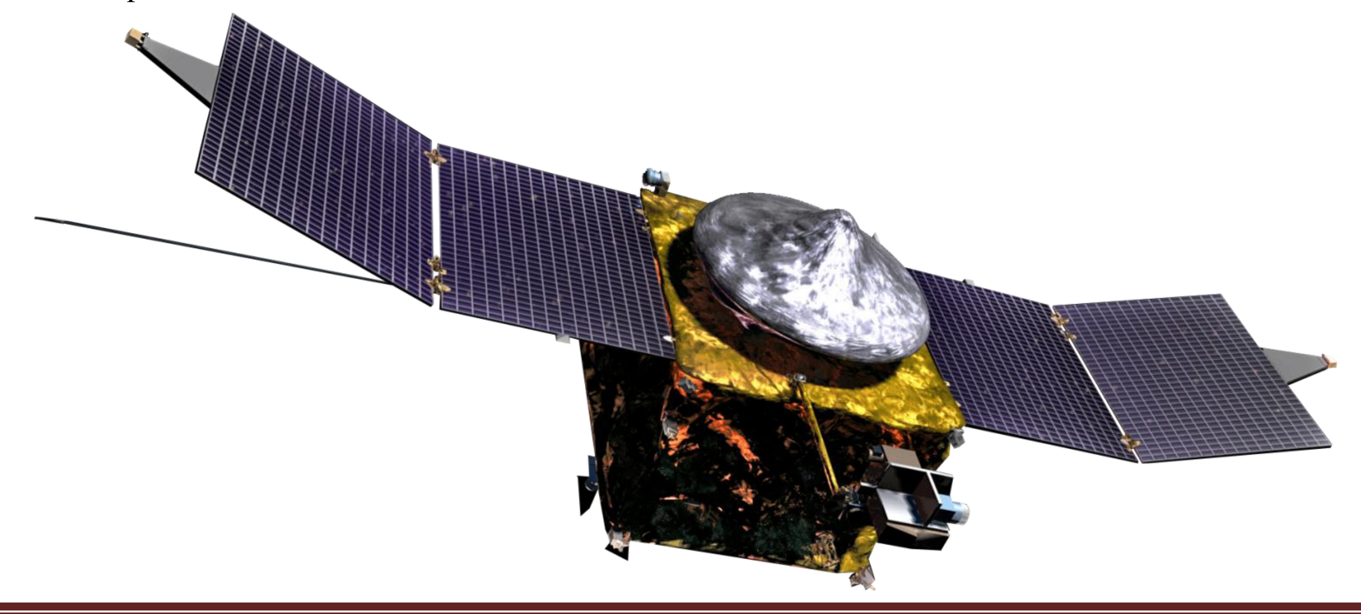
Si bien existen actualmente muchas sondas espaciales en órbita, rovers y landers que están estudiando Marte, después de la malograda sonda Mars Climate Orbiter, la más importante con respecto al estudio de la atmósfera del planeta es la sonda MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN); lanzada el 18-11-2013 a bordo de un cohete Atlas V desde Cabo Cañaveral.

Como instrumentos científicos lleva magnetómetros; analizador de electrones del viento solar; sonda Langmuir para determinar las propiedades de la ionosfera; espectrómetro UV de imágenes; espectrómetro de masas de iones y gases neutros; analizador de iones de viento solar, entre otros.

El objetivo de la misión es determinar la historia de la pérdida de gases atmosféricos al espacio, proporcionando respuestas sobre la evolución del clima de Marte midiendo la velocidad con la que la atmósfera escapa al espacio y reuniendo suficiente información sobre los procesos relevantes; los principales objetivos científicos de la misión fueron los de medir la composición y estructura de la atmósfera superior y la ionosfera, y determinar los procesos responsables de controlarlas; determinar propiedades y características que nos permitirán extrapolar hacia atrás en el tiempo para determinar la pérdida integrada al espacio a lo largo de los cuatro mil millones de años de historia registrados en el registro geológico y medir la tasa de pérdida de gas desde la parte superior de la atmósfera hacia el espacio y determinar los procesos responsables de controlarlas.

El 16-11-2014, los investigadores completaron las actividades de puesta en servicio de MAVEN y comenzaron su misión científica principal, programada para durar un año; durante ese tiempo la sonda midió cómo los gases volátiles son arrastrados por el viento solar y realizó cuatro inmersiones profundas hasta el borde de las atmósferas superior e inferior para caracterizar mejor toda la atmósfera superior del planeta; en 2015, la fase científica se extendió hasta septiembre de 2016, lo que permitió a MAVEN observar la atmósfera marciana durante todas las estaciones del planeta; luego se aprobó una misión extendida adicional de dos años hasta septiembre de 2018.

El 5-04-2019, el equipo de navegación completó una maniobra de frenado aerodinámico de dos meses para bajar la órbita de MAVEN y permitirle servir mejor como relevo de comunicaciones para los landers, así como para el rover Perseverance, esta nueva órbita elíptica tiene aproximadamente 4500 x 130 Km; en septiembre de 2020, la nave también continúa su misión científica, con todos los instrumentos todavía en funcionamiento y con suficiente combustible para durar al menos hasta 2030.



Atmósfera de Ceres (planeta enano)

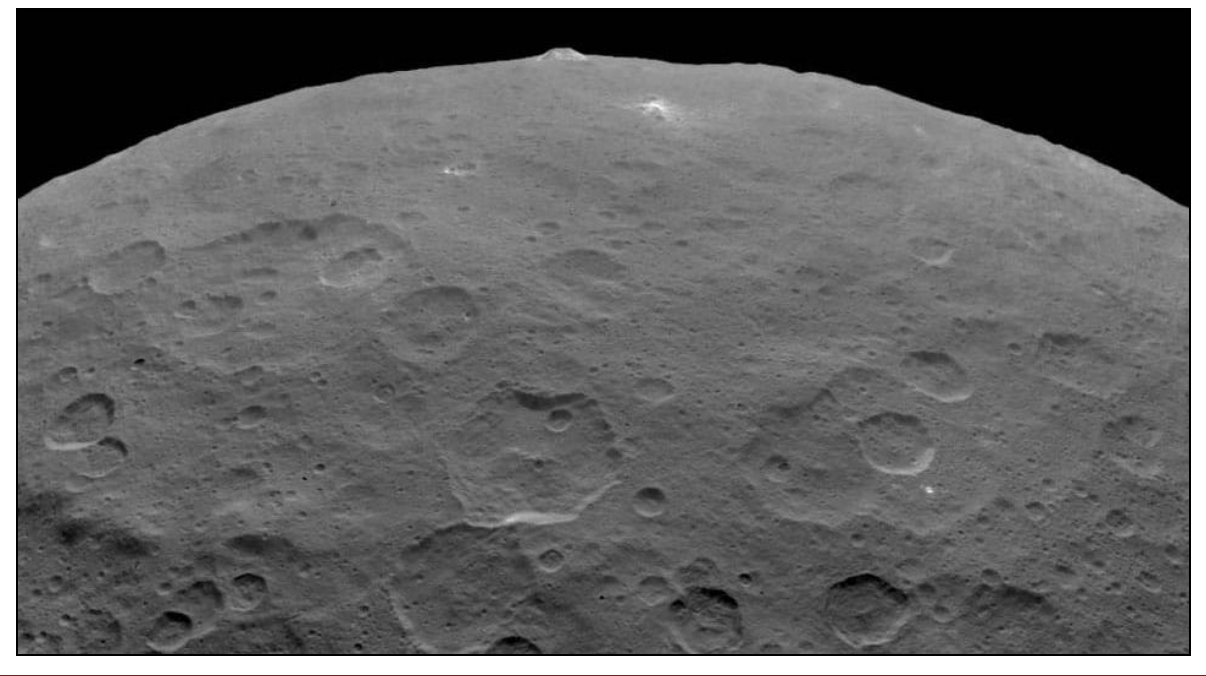
Ceres es el objeto astronómico más grande del cinturón de asteroides, región del Sistema Solar que se encuentra entre las órbitas de Marte y Júpiter; su diámetro es de aproximadamente 945 Km; posiblemente es un protoplaneta superviviente de los primeros estadios de formación del Sistema Solar, originado hace 4570 millones de años en el cinturón de asteroides, fue visitado por la sonda Dawn desde 2015 a 2018.

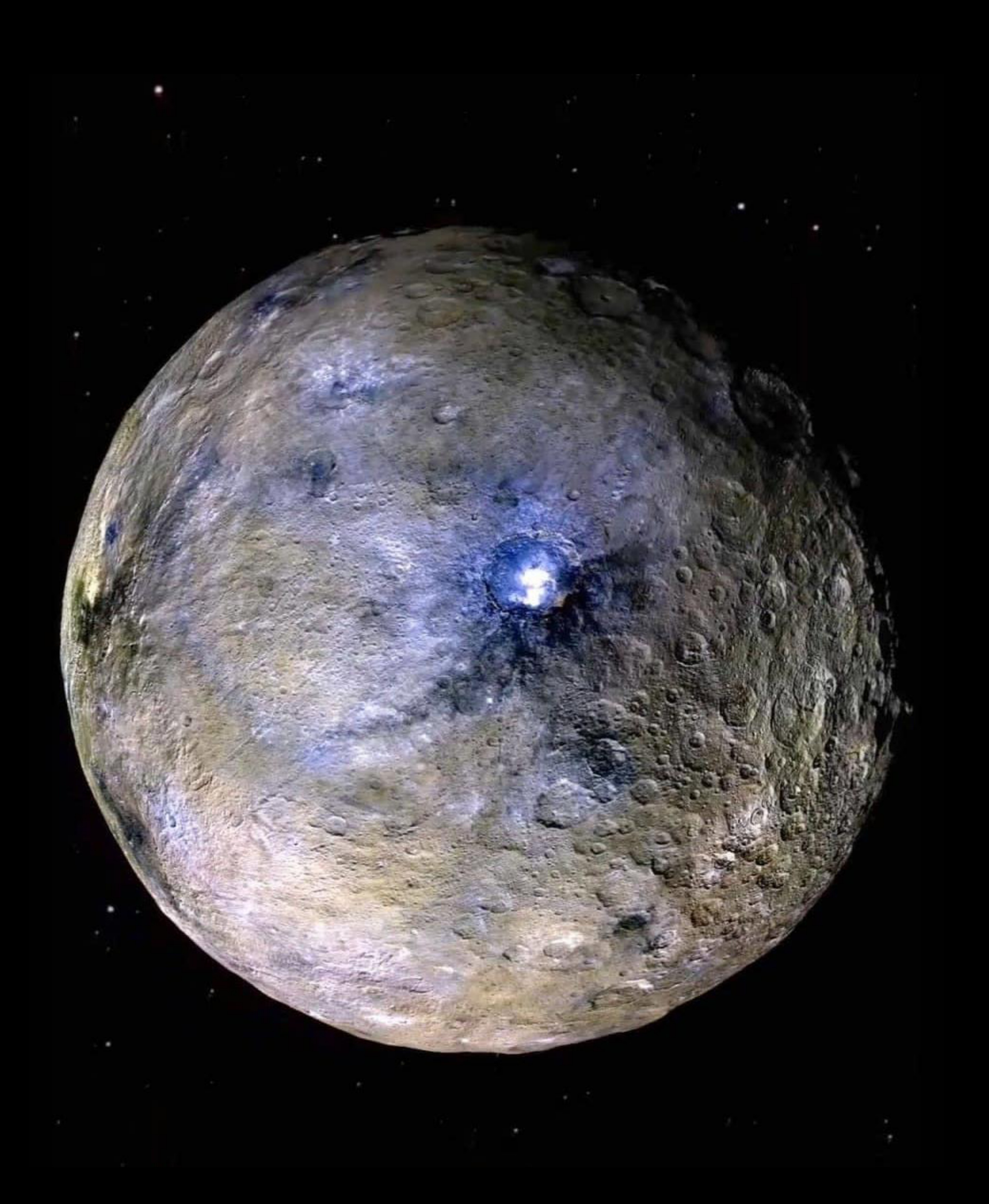
Existen indicios de que Ceres puede tener una atmósfera tenue de vapor de H2O por la sublimación del hielo acuoso de la superficie; el hielo acuoso superficial es inestable a distancias inferiores a 5 unidades astronómicas del Sol, por lo que se espera que se sublime si se expone directamente a la radiación solar, puede migrar de las capas interiores a la superficie, pero se escapa al espacio en poco tiempo, como resultado, es difícil detectar la vaporización del agua.

A principios de la década de 1990 fue posible observar H2O escapando de las regiones polares, pero no ha llegado a demostrarse de forma inequívoca; puede que sea posible detectar H2O escapando en los alrededores de un cráter de impacto reciente o de las grietas de las capas subsuperficiales; observaciones en UV de la sonda International UV Explorer (IUE) detectaron cantidades significativas de iones de hidróxido cerca del polo N, resultado de la disociación del vapor de H2O por la radiación UV solar.

En 2014, usando datos del Observatorio Espacial Herschel, se descubrió que había varias fuentes de vapor de agua en latitudes medias concentradas en una área de no más de 60 Km de diámetro que emitían aproximadamente 3 Kg/s de agua (en comparación, las lunas Europa y Enceladus emiten 200 y 7000 Kg/s respectivamente).

Dos potenciales regiones de fuentes, designadas Piazzi, y Región A, se han observado en el IR cercano como áreas oscuras, los posibles mecanismos para la liberación del vapor son la sublimación de aprox. 0,6 Km² de hielo expuesto en la superficie, erupciones criovolcánicas resultantes del calor radiogénico interno o la presurización de un océano subsuperficial debido al crecimiento de una capa superpuesta de hielo; la sublimación superficial debería ser más baja cuando Ceres se encuentra más lejos del Sol, las emisiones que se alimentan de procesos internos serían independientes de la posición orbital; los escasos datos disponibles son más compatibles con el estilo de sublimación cometario.





Atmósfera de Júpiter

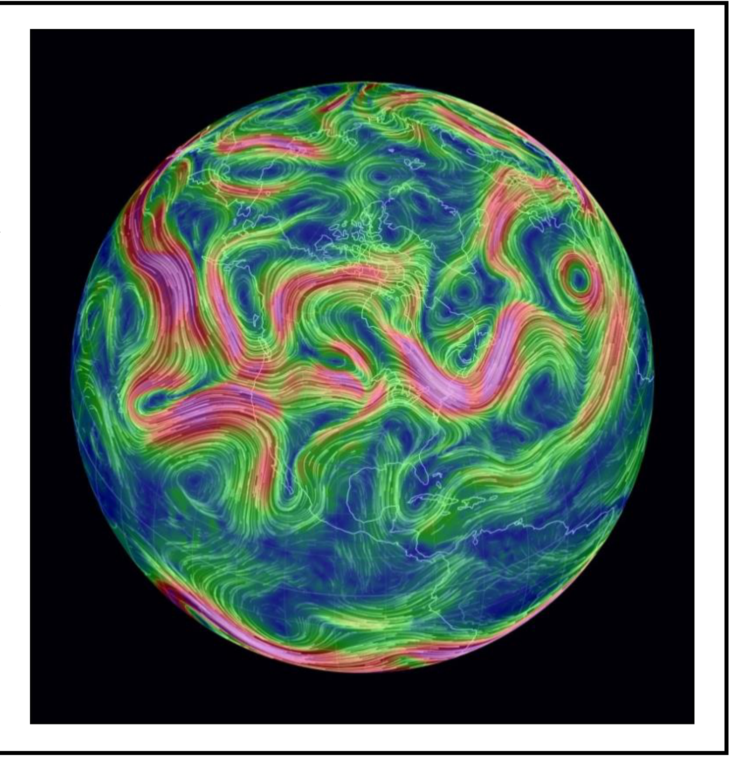
La atmósfera de Júpiter se clasifica en cuatro capas, aumentando la altitud, troposfera, estratosfera, termosfera y exosfera, este planeta no tiene una superficie sólida y la capa atmosférica más baja (troposfera) hace una transición suave hacia el interior fluido del planeta; esto es el resultado de tener temperaturas y presiones muy por encima de los puntos críticos para el Hidrógeno y el Helio, lo que significa que no hay un límite definido entre las fases líquida y gaseosa; el Hidrógeno se convierte en un fluido supercrítico a una presión de alrededor de 12 bares.

Los primeros intentos de explicar la dinámica atmosférica joviana se remontan a la década de 1960; se basaron en parte en la meteorología terrestre, esos modelos poco profundos suponían que los chorros de Júpiter son impulsados por turbulencias a pequeña escala, que a su vez se mantienen por convección húmeda en la capa exterior de la atmósfera (por encima de las nubes de H_2O), la convección húmeda es un fenómeno relacionado con la condensación y evaporación del H_2O y es uno de los principales impulsores del clima terrestre; la producción de los chorros en este modelo está relacionada con una propiedad bien conocida de la turbulencia bidimensional, la llamada cascada inversa, en la que pequeñas estructuras turbulentas (vórtices) se fusionan para formar otras más grandes.

El tamaño finito del planeta significa que la cascada no puede producir estructuras más grandes que alguna escala característica, que para Júpiter se llama escala de Rhines, su existencia está relacionada con la producción de ondas de Rossby, este proceso funciona de la siguiente manera: cuando las estructuras turbulentas más grandes alcanzan un cierto tamaño, la energía comienza a fluir hacia las ondas de Rossby en lugar de las estructuras más grandes, y la cascada inversa se detiene, dado que el planeta gira rápidamente, la relación de dispersión de las ondas de Rossby es anisotrópica, la escala de Rhines en la dirección paralela al ecuador es mayor que en la dirección ortogonal a este; el resultado final del proceso descrito anteriormente es la producción de estructuras alargadas a gran escala, que son paralelas al ecuador; la extensión meridional de ellos parece coincidir con el ancho real de los chorros. Por lo tanto, en modelos poco profundos, los vórtices alimentan a los chorros y deberían desaparecer al fusionarse con ellos.

Las ondas de Rossby barotrópicas, denominadas así por Carl-Gustaf Rossby que las identificó en 1939, son oscilaciones que se producen en los fluidos geofísicos (océano y atmósfera) y que tienen su origen en el principio de conservación de la vorticidad potencial; la propagación de la fase de las ondas de Rossby es siempre hacia el O aun cuando la energía (velocidad de grupo) puede ser hacia el E (ondas cortas) o el O (ondas largas); se conocen también en geofísica como ondas planetarias.

Estas ondas están relacionadas con sistemas de presión (diferencias de presión en la superficie del océano) y corrientes en chorro, las ondas de Rossby oceánicas se desplazan por la termoclina, la frontera entre la capa superior templada y la parte fría profunda del océano.

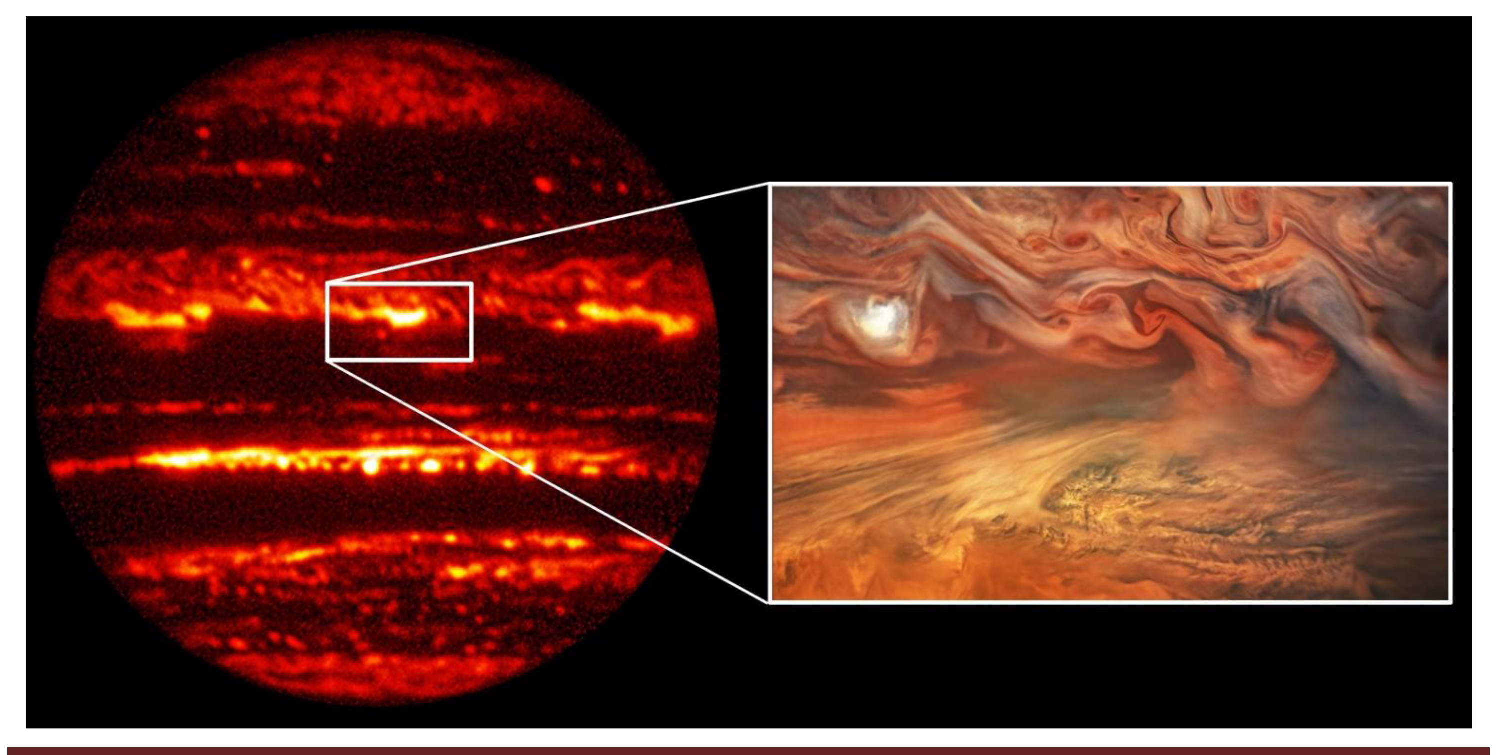


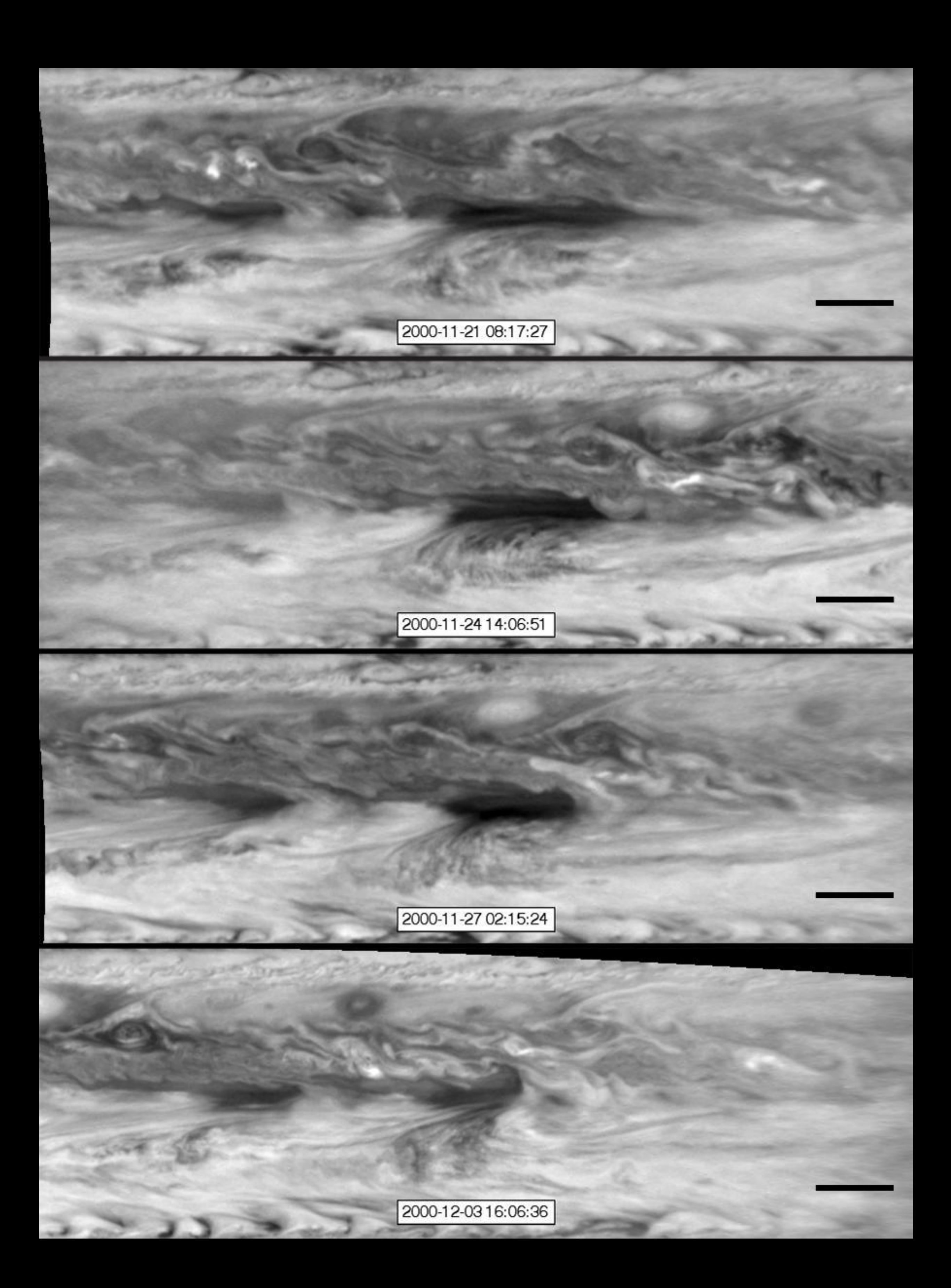
En la turbulenta atmósfera de Júpiter, los espacios vacíos sin nubes son tan excepcionales que los más grandes reciben el nombre especial de puntos calientes, cómo se forman exactamente estos claros y por qué se encuentran sólo en las proximidades del ecuador del planeta, han sido misterios muy debatidos por la comunidad científica, valiéndose de imágenes captadas por la sonda Cassini-Huygens, los científicos han encontrado nuevas evidencias de que los puntos calientes en la atmósfera de Júpiter son creados por una onda de Rossby, patrón que en la Tierra interviene en la dinámica de la atmósfera y la del mar.

Abarcando un período de aproximadamente dos meses de observación, en el estudio se han examinado los cambios diarios y semanales en el tamaño y la forma de los puntos calientes, la mayor parte de lo que se conocía sobre los puntos calientes se obtuvo a partir de la misión de la sonda Galileo, que incluyó la liberación de una cápsula de descenso que se internó dentro de un punto caliente en 1995, siendo hasta ahora la única, investigación in situ de la atmósfera de Júpiter.

Como los puntos calientes son espacios sin nubes, proporcionan ventanas a través de las cuales es factible observar capas más internas de la atmósfera que normalmente no pueden ser observadas, incluyendo quizá la capa donde se forman nubes de agua, en las fotografías con luz visible, los puntos calientes aparecen oscuros, pero dado que las capas más profundas son más cálidas, en las fotos tomadas con luz IR esos mismos puntos aparecen como zonas muy luminosas.

Una hipótesis para explicar su existencia es que los puntos calientes se forman cuando grandes masas gaseosas se hunden en la atmósfera y se calientan o pierden su humedad en el proceso, pero la llamativa regularidad de los puntos calientes ha llevado a algunos investigadores a sospechar que hay una onda atmosférica involucrada en el proceso, ciertos patrones de posicionamiento de los puntos calientes se podrían explicar por una onda que empuja el aire frío hacia abajo, despedazando las nubes locales, y haciendo ascender aire cálido; se ha podido observar que los movimientos de los puntos calientes encajan con el patrón de una onda de Rossby en la atmósfera, la onda responsable de la formación de los puntos calientes también circunvala al planeta de O a E, pero en vez de oscilar al N y al S, oscila hacia arriba y hacia abajo en la atmósfera; los investigadores estiman que esta onda puede tener una amplitud entre el pico más alto y su valle más bajo de entre 24 y 50 Km de altitud aproximadamente.

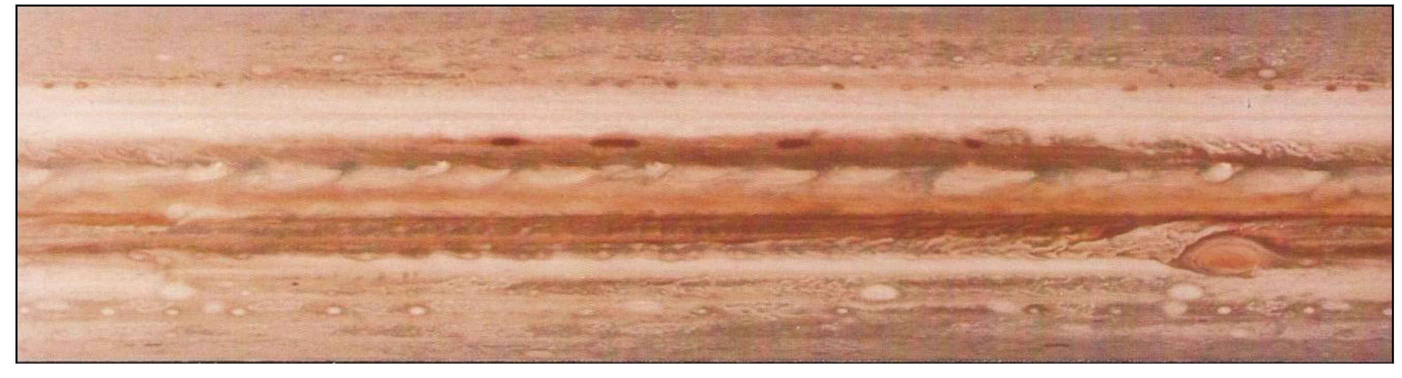


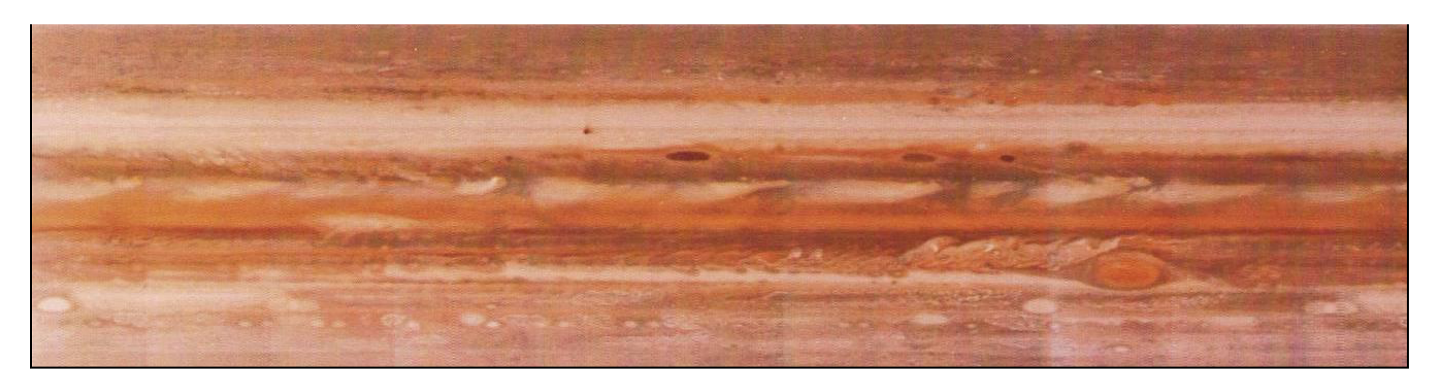

2000-11-21 08:17:27
2000-11-24 14:06:51
2000-11-27 02:15:24
2000-12-03 16:06:36

Si bien estos modelos de capas climáticas pueden explicar con éxito la existencia de una docena de chorros estrechos, tienen serios problemas, un fallo flagrante del modelo es el chorro ecuatorial progrado (superrotatorio): con algunas raras excepciones, los modelos poco profundos producen un fuerte chorro retrógrado (subrrotante), contrariamente a las observaciones, además, los chorros tienden a ser inestables y pueden desaparecer con el tiempo; los modelos poco profundos no pueden explicar cómo los flujos atmosféricos observados en Júpiter violan los criterios de estabilidad, las versiones multicapa más elaboradas de los modelos de capas meteorológicas producen una circulación más estable, pero persisten muchos problemas; la sonda Galileo encontró que los vientos en Júpiter se extienden muy por debajo de las nubes de agua a 5-7 bares y no muestran ninguna evidencia de desintegración hasta un nivel de presión de 22 bares, lo que implica que la circulación en la atmósfera joviana puede de hecho ser profunda.

El modelo profundo fue propuesto por primera vez por Busse en 1976; su modelo se basó en otra característica bien conocida de la mecánica de fluidos, el teorema de Taylor-Proudman, que sostiene que en cualquier líquido ideal barotrópico de rotación rápida, los flujos están organizados en una serie de cilindros paralelos al eje de rotación; las condiciones del teorema probablemente se cumplan en el fluido interior joviano. Por lo tanto, el manto de Hidrógeno molecular del planeta puede dividirse en cilindros, cada cilindro tiene una circulación independiente de los demás, aquellas latitudes donde los límites externos e internos de los cilindros se cruzan con la superficie visible del planeta corresponden a los chorros; los cilindros mismos se observan como zonas y correas

El modelo profundo explica fácilmente el fuerte chorro progrado observado en el ecuador de Júpiter; los chorros que produce son estables y no obedecen al criterio de estabilidad 2D. Sin embargo, tiene grandes dificultades; produce una cantidad muy pequeña de chorros amplios, un modelo publicado en 2004 reprodujo con éxito la estructura de chorro de banda joviana, supuso que el manto de Hidrógeno molecular es más delgado que en todos los demás modelos; ocupando solo el 10 % exterior del radio de Júpiter; en los modelos estándar del interior joviano, el manto comprende el 20-30 % exterior; el impulso de la circulación profunda es otro problema, los flujos profundos pueden ser causados tanto por fuerzas superficiales (convección húmeda) como por convección profunda en todo el planeta que transporta el calor fuera del interior de Júpiter.





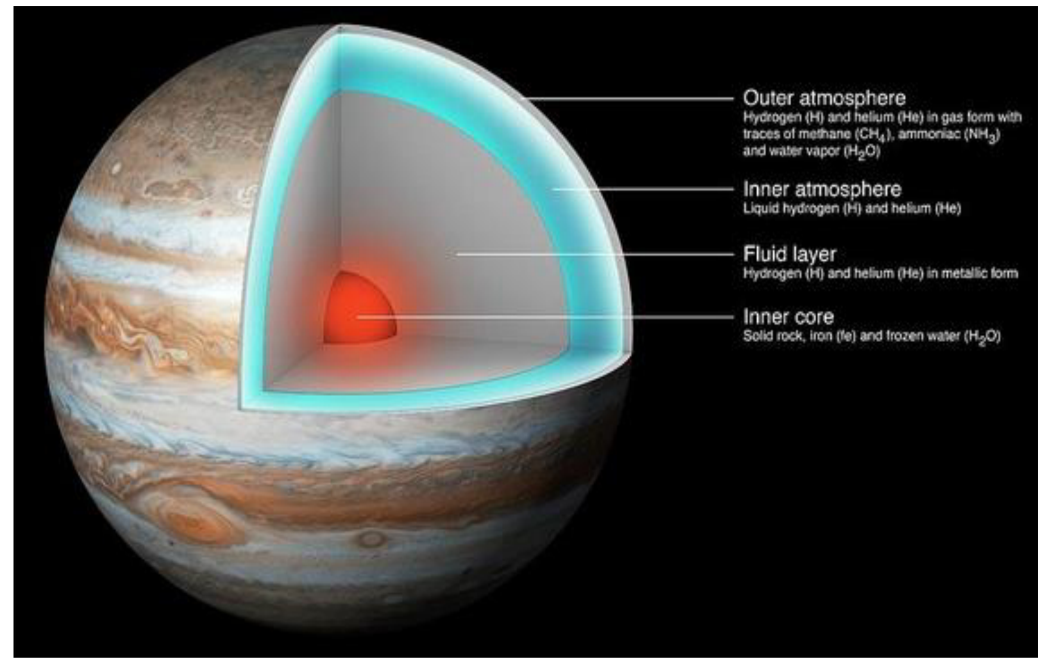
Troposfera

Dado que el límite inferior de la atmósfera está mal definido, el nivel de presión de 10 bares, a una altitud de aproximadamente 90 Km por debajo de 1 bar con una temperatura de alrededor de 60 °C, se trata comúnmente como la base de la troposfera (el nivel de presión de 1 bar generalmente se elige como un punto cero para las altitudes, lo que sería una superficie en Júpiter), al igual que con la Tierra, la capa atmosférica superior (exosfera) no tiene un límite superior definido, la densidad disminuye gradualmente hasta que pasa suavemente al medio interplanetario (aprox. a 5000 Km por encima de la denominada superficie).

La temperatura de la troposfera disminuye con la altura hasta que alcanza un mínimo en la tropopausa, que es el límite entre la troposfera y la estratosfera; en Júpiter, la tropopausa está aproximadamente a 50 Km por encima de las nubes visibles (o al nivel de 1 bar), donde la presión y la temperatura son de aproximadamente 0,1 bar y -163 °C; en la estratosfera, las temperaturas se elevan a unos -73 °C en la transición a la termosfera, a una altitud de unos 320 Km, en la termosfera, las temperaturas continúan aumentando, llegando finalmente a 726 °C a unos 1000 Km.

La troposfera contiene una complicada estructura de nubes, las superiores, ubicadas en el rango de presión de 0,6 a 0,9 bar, están hechas de hielo de amoníaco; debajo de estas nubes de hielo, se cree que las nubes más densas están hechas de hidrosulfuro o sulfuro de Amonio, entre 1 y 2 bares y agua (3-7 bares); no hay nubes de metano ya que las temperaturas son demasiado altas para que se condense; las nubes de agua forman la capa más densa de nubes y tienen la mayor influencia en la dinámica de la atmósfera.

Este es el resultado de la mayor condensación y abundancia de agua en comparación con el amoníaco y el sulfuro de Hidrógeno (el Oxígeno es un elemento químico más abundante que el Nitrógeno o el Azufre); varias capas de neblina troposféricas (a 200/500 mbar) y estratosféricas (a 10/100 mbar) residen sobre las principales capas de nubes; estas últimas hechas de hidrocarburos aromáticos policíclicos pesados condensados o hidracina, que se generan en la estratosfera superior (1-100 mbar) a partir del metano bajo la influencia de la radiación solar UV; la abundancia de metano en relación con el Hidrógeno molecular en la estratosfera es de aproximadamente 10^{-4}, mientras que la proporción de abundancia de otros hidrocarburos ligeros, como etano y acetileno, con respecto al Hidrógeno molecular es de aproximadamente 10^{-6}.



Termosfera

Se encuentra a presiones inferiores a 1 µbar (10-6 bares) y muestra fenómenos como resplandor de aire, auroras polares y emisiones de rayos X, en su interior se encuentran capas de mayor densidad de electrones e iones que forman la ionosfera, las altas temperaturas que prevalecen en la termosfera (520-720 °C) aún no se han explicado completamente; los modelos existentes predicen una temperatura no superior a unos 125 °C, pueden ser causados por la absorción de radiación solar de alta energía (rayos UV o rayos X), por calentamiento de las partículas cargadas que precipitan de la magnetosfera joviana, o por disipación de ondas de gravedad que se propagan hacia arriba.

La termosfera y la exosfera en los polos y en latitudes bajas emiten rayos X, que fueron observados por primera vez por el Observatorio Einstein en 1983, las partículas energéticas provenientes de la magnetosfera de Júpiter crean óvalos aurorales brillantes, que rodean los polos; a diferencia de sus análogos terrestres, que aparecen solo durante las tormentas magnéticas, las auroras son características permanentes de la atmósfera de Júpiter; la termosfera fue el primer lugar fuera de la Tierra donde el catión trihidrógeno (H+3) fue descubierto, este ión emite fuertemente en la parte del IR medio del espectro, a longitudes de onda entre 3 y 5 µm; principal mecanismo de enfriamiento de la termosfera.

La composición atmosférica de Júpiter es similar a la del planeta en su conjunto, los componentes principales de la atmósfera son el Hidrógeno molecular (H2) y el Helio; la abundancia de Helio es 0,157±0,004 en relación con el Hidrógeno molecular por número de moléculas, y su fracción de masa es 0,234±0,005, que es ligeramente inferior al valor primordial del Sistema Solar; la razón de esta baja abundancia no se comprende del todo, pero parte del Helio puede haberse condensado en el núcleo de Júpiter.

Es probable que esta condensación se produzca en forma de lluvia de Helio, a medida que el Hidrógeno pasa al estado metálico a profundidades de más de 10000 Km, el Helio se separa de él formando gotitas que, siendo más densas que el Hidrógeno metálico, descienden hacia el núcleo, esto también puede explicar el agotamiento severo del Neón, elemento que se disuelve fácilmente en gotas de Helio y también sería transportado en ellas hacia el núcleo.

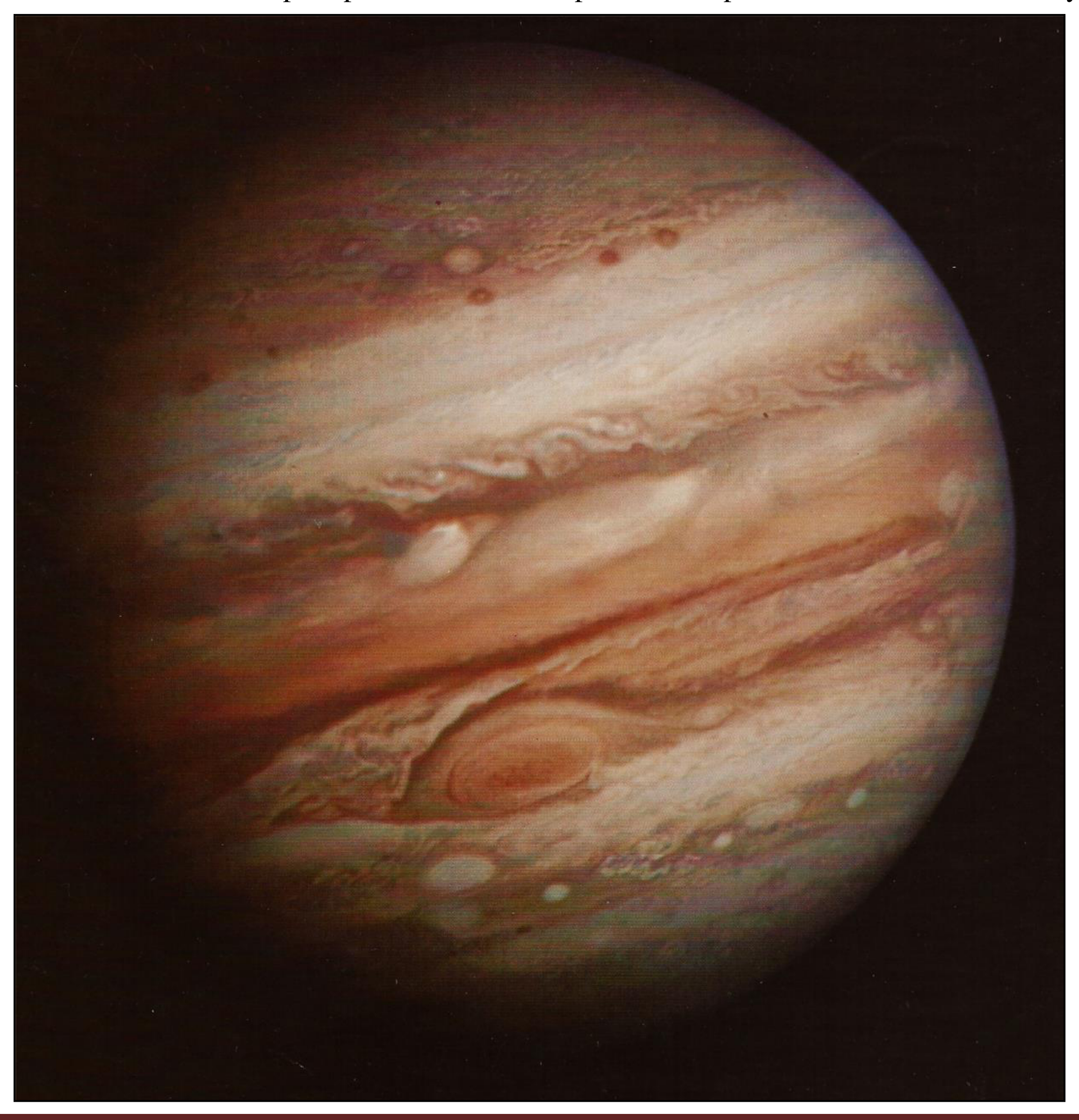
La atmósfera contiene varios compuestos simples como agua, metano, sulfuro de Hidrógeno, amoniaco y fosfina; su abundancia en la troposfera profunda (por debajo de 10 bares) implica que la atmósfera de Júpiter está enriquecida en los elementos Carbono, Nitrógeno, Azufre y posiblemente Oxígeno por un factor de 2-4 en relación con el Sol; los gases nobles como el Argón, Criptón y Xenón también aparecen en abundancia en relación con los niveles solares, mientras que el Neón es más escaso.

Otros compuestos químicos como la arsina y el germanio están presentes sólo en cantidades traza, la atmósfera superior de Júpiter contiene pequeñas cantidades de hidrocarburos simples como etano, acetileno y diacetileno, que se forman a partir del metano bajo la influencia de la radiación UV solar y partículas cargadas provenientes de la magnetosfera de Júpiter; se cree que el dióxido de Carbono, el monóxido de Carbono y el agua presentes en la atmósfera superior se originan por impactos de cometas, el agua no puede provenir de la troposfera porque la tropopausa fría actúa como una trampa fría, evitando efectivamente que el agua suba a la estratosfera.

Bandas atmosféricas

La superficie visible de Júpiter se divide en varias bandas paralelas al ecuador, hay dos tipos de bandas: zonas de colores claros y cinturones relativamente oscuros, la Zona Ecuatorial (EZ), es más amplia se extiende entre las latitudes de aproximadamente 7° S a 7° N, por encima y debajo de la EZ, los cinturones ecuatoriales N y S (NEB y SEB) se extienden hasta 18° N y 18° S, respectivamente; más lejos del ecuador se encuentran las zonas tropicales N y S (NtrZ y STrZ), el patrón alterno de cinturones y zonas continúa hasta las regiones polares en los 50° de latitud, la estructura básica de la zona del cinturón probablemente se extiende bien hacia los polos, llegando a los 80° N o S.

La diferencia en la apariencia entre zonas y cinturones se debe a diferencias en la opacidad de las nubes, la concentración de amoníaco es mayor en las zonas, lo que conduce a la aparición de nubes más densas de hielo de amoníaco en altitudes más altas, lo que a su vez conduce a su color más claro; por otro lado, en los cinturones las nubes son más delgadas y se ubican en altitudes más bajas; la troposfera superior es más fría en las zonas y más cálida en los cinturones; se desconoce la naturaleza exacta de los productos químicos que hacen que las zonas y bandas jovianas sean tan coloridas, pero pueden incluir compuestos complicados de Azufre, Fósforo y Carbono.



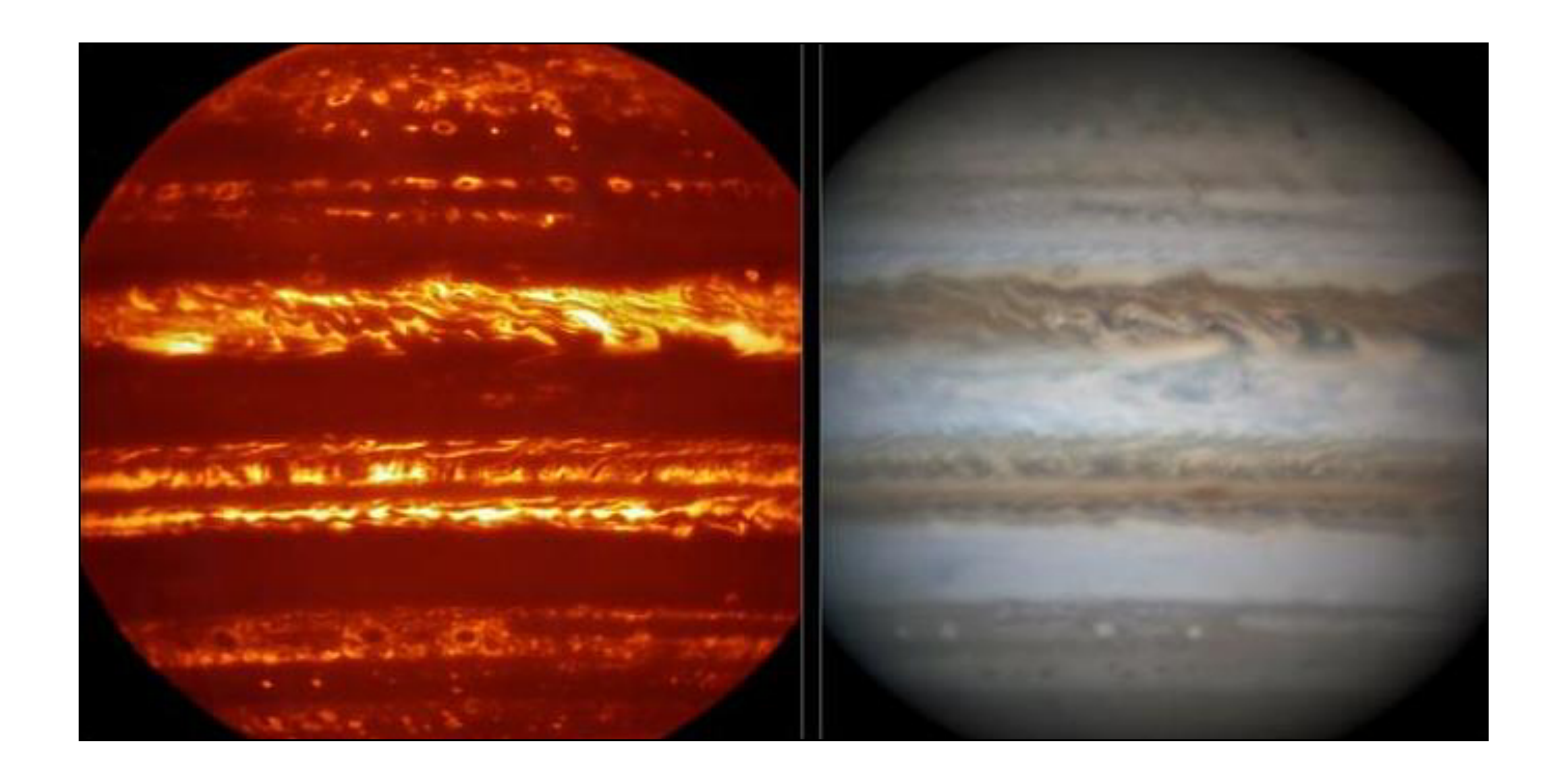


Las bandas jovianas están limitadas por flujos atmosféricos zonales (vientos), denominados chorros; hacia el E (progrados) se encuentran en la transición de zonas a cinturones (alejándose del ecuador), mientras que los que van hacia el O (retrógrados) marcan la transición de cinturones a zonas; tales patrones de velocidad de flujo significan que los vientos zonales disminuyen en los cinturones y aumentan en las zonas desde el ecuador hasta el polo, por tanto, la cizalladura del viento en los cinturones es ciclónica, mientras que en las zonas es anticiclónica.

La EZ es una excepción a esta regla, que muestra un fuerte chorro hacia el E y tiene un mínimo local de la velocidad del viento exactamente en el ecuador; las velocidades del chorro son altas en Júpiter, alcanzando más de 360 Km/h, velocidades que corresponden a nubes de amoníaco ubicadas en el rango de presión de 0,7 a 1 bar; los chorros progrados son generalmente más potentes que los chorros retrógrados; se descomponen en dos o tres alturas de escala, por encima de las nubes, mientras que por debajo del nivel de las nubes, los vientos aumentan ligeramente y luego permanecen constantes hasta al menos 22 bar (la profundidad operativa máxima alcanzada por la sonda Galileo).

El origen de la estructura de bandas de Júpiter no está completamente claro, la interpretación más simple es que las zonas son sitios de afloramiento atmosférico, mientras que los cinturones son manifestaciones de afloramiento, cuando el aire enriquecido en amoníaco sube en zonas, se expande y se enfría, formando nubes altas y densas.

En los cinturones atmosféricos, sin embargo, el aire desciende calentándose adiabáticamente, y las nubes de amoníaco (blancas) se evaporan, revelando nubes más bajas y oscuras; la ubicación y ancho de las bandas, velocidad y la ubicación de los chorros en Júpiter son notablemente estables, habiendo cambiado solo ligeramente entre 1980 y 2000, las bandas varían en coloración e intensidad con el tiempo, estas variaciones se observaron por primera vez a principios del siglo XVII.



Los cinturones y zonas que dividen la atmósfera de Júpiter tienen cada uno sus propios nombres y características únicas, comienzan debajo de las regiones polares N y S, que se extienden desde los polos hasta aproximadamente 40-48° N/S, regiones de color gris azulado que suelen carecer de rasgos característicos.

La región templada N-N rara vez muestra más detalles que las regiones polares, debido al oscurecimiento de las extremidades y la difusión general de las características. Sin embargo, el Cinturón Templado N-N (NNTB) es el cinturón distintivo más al N, aunque ocasionalmente desaparece, los disturbios tienden a ser menores y de corta duración; la Zona Templada N-N (NNTZ) es quizás más prominente y más tranquila, ocasionalmente se observan otros cinturones y zonas menores de la región.

La Región Templada del N es parte de una región latitudinal fácilmente observable desde la Tierra, presenta la corriente en chorro prograda más fuerte del planeta, una corriente del O forma el límite S del Cinturón Templado N (NTB); la NTB se desvanece aproximadamente una vez por década, lo que hace que la Zona Templada N (NTZ) aparentemente se fusione con la Zona Tropical N (NTropZ), otras veces, la NTZ está dividida por un cinturón estrecho en componentes N y S.

La Región Tropical del N está compuesta por la NTropZ y el Cinturón Ecuatorial N (NEB), la NTropZ es generalmente estable en coloración, cambiando de tinte solo en conjunto con la actividad en la corriente en chorro S del NTB; al igual que la NTZ, a veces también está dividida por una banda estrecha, la NTropB.

El NEB es uno de los cinturones más activos del planeta, se caracteriza por óvalos blancos anticiclónicos (también conocidos como óvalos marrones), y los primeros suelen formarse más al N que los segundos; como en NTropZ, la mayoría de estas características tienen una vida relativamente corta, al igual que el Cinturón Ecuatorial S (SEB), el NEB a veces se ha desvanecido y revivido, la escala de tiempo de estos cambios es de unos 25 años.

La amplia zona ecuatorial es visible en el centro rodeada por dos cinturones ecuatoriales oscuros (SEB y NEB), los grandes puntos calientes irregulares de color azul grisáceo en el borde N de la Zona Ecuatorial blanca cambian con el transcurso del tiempo a medida que marchan hacia el E a través del planeta; la Gran Mancha Roja se encuentra en el margen S del SEB, pequeñas tormentas giran alrededor de los óvalos del hemisferio N, y posibles tormentas eléctricas, aparecen rápida y aleatoriamente en regiones turbulentas, las características más pequeñas visibles en el ecuador tienen unos 600 Km de diámetro.

La Región Ecuatorial es una de las regiones más estables del planeta, en latitud y actividad. El borde norte de la EZ alberga columnas espectaculares que se arrastran hacia el suroeste desde el NEB, que están delimitadas por características oscuras y cálidas (en IR) conocidas como festones (puntos calientes). Aunque el límite sur de la EZ suele estar inactivo, las observaciones desde finales del siglo XIX hasta principios del siglo XX muestran que este patrón se invirtió con respecto a la actualidad. La EZ varía considerablemente en coloración, de pálido a ocre , o incluso cobrizo; ocasionalmente se divide por una banda ecuatorial (EB). Las características de la EZ se mueven aproximadamente 390 Km/h en relación con las otras latitudes.

La Región Tropical S incluye el Cinturón Ecuatorial S (SEB) y la Zona Tropical S, es la región más activa del planeta, ya que alberga su corriente en chorro retrógrada más fuerte, el SEB suele ser el cinturón más ancho y oscuro de Júpiter; a veces se divide en una zona (la SEBZ) y puede desaparecer por completo cada 3 a 15 años antes de reaparecer en lo que se conoce como un ciclo de reactivación de SEB, un período de semanas o meses después de la desaparición del cinturón, se forma una mancha blanca y hace erupción un material de color marrón oscuro que se estira en un nuevo cinturón por los vientos de Júpiter, el cinturón desapareció en mayo de 2010.

Otra característica del SEB es un largo tren de perturbaciones ciclónicas que sigue a la Gran Mancha Roja, al igual que en las NTropZ, STropZ es una de las zonas más prominentes del planeta; no solo contiene la Gran mancha Roja, sino que ocasionalmente aparece el Disturbio Tropical Sur (STropD), una división de la zona que puede ser muy longeva; el más famoso duró desde 1901 hasta 1939.

La Región Templada S, o Cinturón Templado S (STB), es otro cinturón oscuro y prominente, más que el NTB; hasta marzo de 2000, sus características más famosas eran los óvalos blancos de larga duración BC, DE y FA, que desde entonces se han fusionado para formar Oval BA

Los óvalos eran parte de la Zona Templada S, pero se extendían hasta STB bloqueándola parcialmente; el STB se ha desvanecido ocasionalmente, aparentemente debido a interacciones complejas entre los óvalos blancos y la Gran Mancha Roja; la apariencia de la Zona Templada S (STZ), la zona en la que se originaron los óvalos blancos, es muy variable.

Hay otras características en Júpiter que son temporales o difíciles de observar desde la Tierra, la Región Templada S-S es más difícil de discernir incluso que la Región Templada N-N; su detalle es sutil y solo puede estudiarse con grandes telescopios o naves espaciales, muchas zonas y cinturones son de naturaleza más transitoria y no siempre son visibles, estos incluyen la Banda Ecuatorial (EB), la zona del Cinturón Ecuatorial N (NEBZ, una zona blanca dentro del cinturón) y la Zona del Cinturón Ecuatorial S (SEBZ).

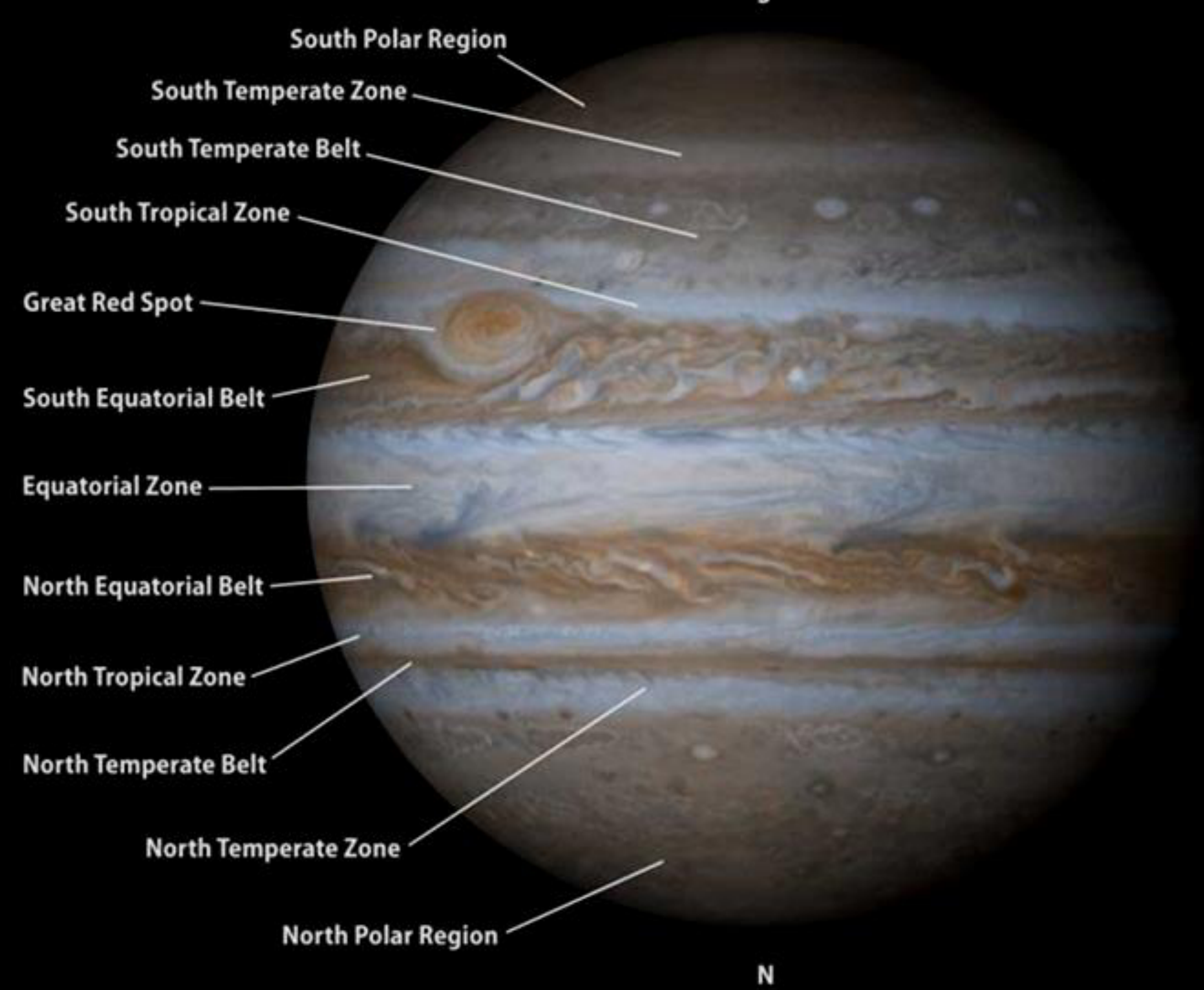
Los cinturones también se parten ocasionalmente por una alteración repentina, cuando una perturbación divide un cinturón o zona normalmente singular, una N o una S se agrega para indicar si el componente es el N o el S; por ejemplo, NEB (N) y NEB (S).

La circulación atmosférica de Júpiter es marcadamente diferente a la terrestre, el interior de Júpiter es fluido y carece de superficie sólida, por lo tanto, la convección puede ocurrir en toda la envoltura molecular exterior del planeta.

Cualquier teoría sobre la dinámica de la atmósfera joviana necesita explicar los siguientes hechos: la existencia de bandas estrechas y estables y chorros que son simétricos en relación con el ecuador de Júpiter, el fuerte chorro progrado observado en el ecuador la diferencia entre zonas y cinturones, y el origen y persistencia de grandes vórtices como la Gran Mancha Roja.

Las teorías sobre la dinámica de la atmósfera joviana se pueden dividir en dos clases: superficial y profunda, los primeros sostienen que la circulación observada se limita en gran medida a una fina capa exterior (meteorológica) del planeta, que se superpone al interior estable.

La última hipótesis postula que los flujos atmosféricos observados son solo una manifestación superficial de una circulación profundamente arraigada en la envoltura molecular exterior de Júpiter, como ambas teorías tienen sus propios éxitos y fracasos, muchos científicos planetarios piensan que la verdadera teoría incluirá elementos de ambos modelos.


S
South Polar Region
South Temperate Zone
South Temperate Belt
South Tropical Zone
Great Red Spot
South Equatorial Belt
Equatorial Zone
North Equatorial Belt
North Tropical Zone
North Temperate Belt
North Temperate Zone
North Polar Region
N

Júpiter irradia mucho más calor del que recibe del Sol, se estima que la relación entre la potencia térmica emitida por el planeta y la potencia térmica absorbida por el Sol es de 1,67 ±0,09; el flujo de calor interno de Júpiter es de 5,44 ±0,43 W/m^2, mientras que la potencia total emitida es de 335 ±26 Petavatios (mil millonésima parte de la potencia total irradiada por el Sol), este exceso de calor es principalmente el calor primordial de las primeras fases de la formación de Júpiter, pero puede resultar en parte de la precipitación de Helio en el núcleo.

El calor interno puede ser importante para la dinámica de la atmósfera joviana, Júpiter tiene una pequeña oblicuidad de aproximadamente 3° y sus polos reciben mucha menos radiación solar que su ecuador, las temperaturas de la troposfera no cambian apreciablemente del ecuador a los polos, una explicación es que el interior convectivo de Júpiter actúa como un termostato, liberando más calor cerca de los polos que en la región ecuatorial, esto conduce a una temperatura uniforme en la troposfera; mientras que el calor se transporta desde el ecuador a los polos principalmente a través de la atmósfera de la Tierra, en Júpiter la convección profunda equilibra el calor, se cree que la convección en el interior joviano es impulsada por el calor interno.

La atmósfera de Júpiter alberga cientos de vórtices, estructuras circulares giratorias que se pueden dividir en dos clases: ciclones y anticiclones, los ciclones giran en una dirección similar a la rotación del planeta (en sentido antihorario en el hemisferio N y en sentido horario en el S); los anticiclones giran en sentido inverso. Sin embargo, a diferencia de la atmósfera terrestre, los anticiclones predominan sobre los ciclones en Júpiter: más del 90% de los vórtices de más de 2000 Km de diámetro son anticiclones.

La vida útil de los vórtices jovianos varía desde varios días hasta cientos de años, según su tamaño, la vida media de un anticiclón de entre 1000 y 6000 Km de diámetro es de 1 a 3 años, nunca se han observado vórtices en la región ecuatorial de Júpiter (dentro de los 10° de latitud), donde son inestables, como en cualquier planeta que gira rápidamente, los anticiclones de Júpiter son centros de alta presión, mientras que los ciclones son de baja presión.

Los anticiclones en la atmósfera de Júpiter siempre están confinados dentro de zonas, donde la velocidad del viento aumenta en la dirección desde el ecuador hacia los polos, suelen ser brillantes y aparecen como óvalos blancos. Pueden moverse en longitud, pero permanecen aproximadamente en la misma latitud ya que no pueden escapar de la zona de confinamiento, las velocidades del viento en su periferia son de unos 350 Km/h.

A diferencia de los anticiclones, los ciclones jovianos tienden a ser estructuras pequeñas, oscuras e irregulares, algunas de las características más oscuras y regulares se conocen como óvalos marrones. Sin embargo, se ha sugerido la existencia de algunos ciclones grandes de larga duración, además de los ciclones compactos, Júpiter tiene varios grandes parches filamentosos irregulares, que demuestran la rotación ciclónica.

La estructura profunda de los vórtices no está completamente clara, se cree que son relativamente delgados, ya que cualquier espesor superior a unos 500 Km provocaría inestabilidad, se sabe que los grandes anticiclones se extienden solo unas pocas decenas de Km por encima de las nubes visibles.

Gran Mancha Roja (GRS)

Es una tormenta anticiclónica persistente, 22° al S del ecuador de Júpiter; observaciones de la Tierra establecen una duración mínima de la tormenta de 350 años, según un informe de Giovanni Riccioli en 1635, Leander Bandtius observó una gran mancha que describió como ovalada, equivalente a una séptima parte del diámetro de Júpiter en su parte más larga, y fue descrita como un lugar permanente por Gian Domenico Cassini después de observar la característica en julio de 1665.

Gira en sentido antihorario, con un período de aproximadamente 6 días terrestres, sus dimensiones son de 24000 a 40000 Km de E a O y de 12000 a 14000 Km de N a S; a principios de 2004, la Gran Mancha Roja tenía aproximadamente la mitad de la extensión longitudinal que tenía hace un siglo, al ritmo actual de reducción, podría potencialmente volverse circular para el 2040, aunque esto es poco probable debido al efecto de distorsión de las corrientes en chorro vecinas, no se sabe cuánto tiempo durará la mancha o si el cambio es el resultado de fluctuaciones normales.

Datos en el IR han indicado durante mucho tiempo que la Gran Mancha Roja es más fría (y por lo tanto, más alta en altitud) que la mayoría de las otras nubes del planeta; estando sus nubes a unos 8 Km por encima de las nubes circundantes, además, el seguimiento cuidadoso de las características atmosféricas reveló la circulación en sentido antihorario del lugar ya en 1966, observaciones confirmadas por las primeras películas de lapso de tiempo de los sobrevuelos de la Voyager. El lugar está confinado espacialmente por una modesta corriente en chorro hacia el E (prograda) hacia el S y una muy fuerte hacia el O (retrógrada) hacia el N; aunque los vientos alrededor del borde de la mancha alcanzan un pico de aproximadamente 432 Km/h, las corrientes en su interior parecen estancadas, con poca entrada o salida.

El período de rotación de la mancha ha disminuido con el tiempo, quizás como resultado directo de su constante reducción de tamaño; en 2010, los astrónomos con imágenes en el IR lejano con una resolución espacial más alta que nunca antes, encontraron que su región central, más roja es más caliente que sus alrededores por entre -270 y -269 °C, este punto central cálido contrarrota lentamente y puede ser causado por un hundimiento débil del aire en el centro de GRS.

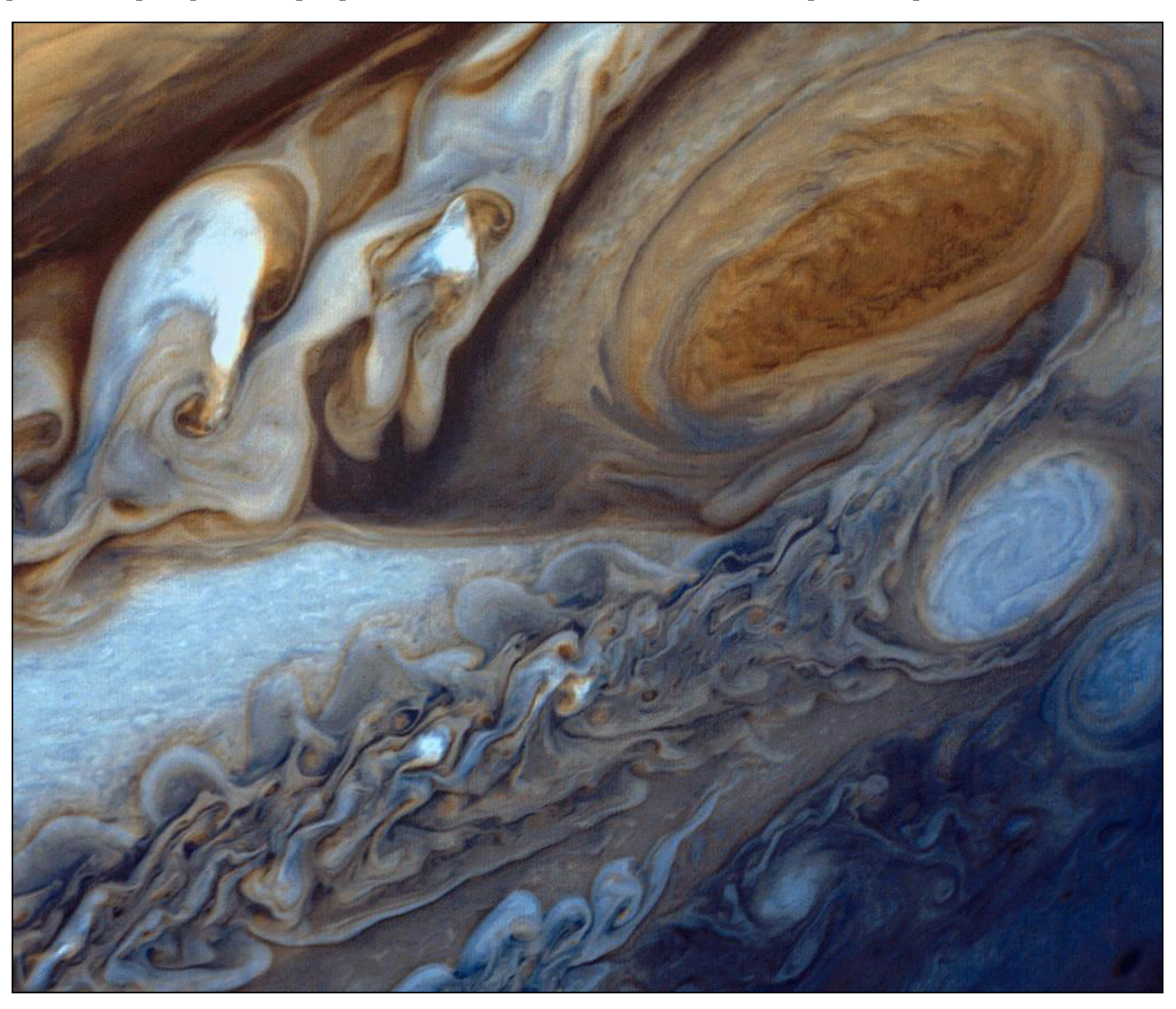
La latitud de la Gran Mancha Roja se ha mantenido estable durante la duración de buenos registros de observación, suele variar en aproximadamente 1°. Sin embargo, su longitud está sujeta a variaciones constantes debido a que las características visibles de Júpiter no giran uniformemente en todas las latitudes, los astrónomos han definido tres sistemas diferentes para definir la longitud.

El Sistema II se utiliza para latitudes de más de 10°, y se basó originalmente en la velocidad de rotación promedio de la Gran Mancha Roja de 9 h 55 m 42 s, su tasa de deriva ha cambiado drásticamente a lo largo de los años y se ha relacionado con el brillo del Cinturón Ecuatorial S y la presencia o ausencia de una perturbación tropical del S.

No se sabe qué causa el color rojizo de la Gran Mancha Roja, las teorías respaldadas por experimentos de laboratorio suponen que el color puede ser causado por moléculas orgánicas complejas como el Fósforo rojo u otro compuesto de Azufre; varía mucho en tonalidad, desde casi rojo ladrillo hasta salmón pálido, o incluso blanco.

La temperatura más alta de la región central más roja es la primera evidencia de que el color de la mancha se ve afectado por factores ambientales, ocasionalmente desaparece del espectro visible, volviéndose evidente solo a través del Cinturón Ecuatorial Sur (SEB), la visibilidad aparentemente está acoplada a la aparición del SEB, cuando el cinturón es de color blanco brillante, la mancha tiende a ser oscura, y cuando está oscuro, la mancha suele ser clara.

Los períodos en los que la mancha es oscura o clara ocurren a intervalos irregulares; en los 50 años desde 1947 hasta 1997, la mancha fue más oscura en los períodos 1961-1966, 1968-1975, 1989-1990 y 1992-1993, en 2014, un análisis de datos de la misión Cassini reveló que el color rojo es probablemente producto de sustancias químicas simples que se rompen por la irradiación solar UV en la atmósfera superior del planeta.

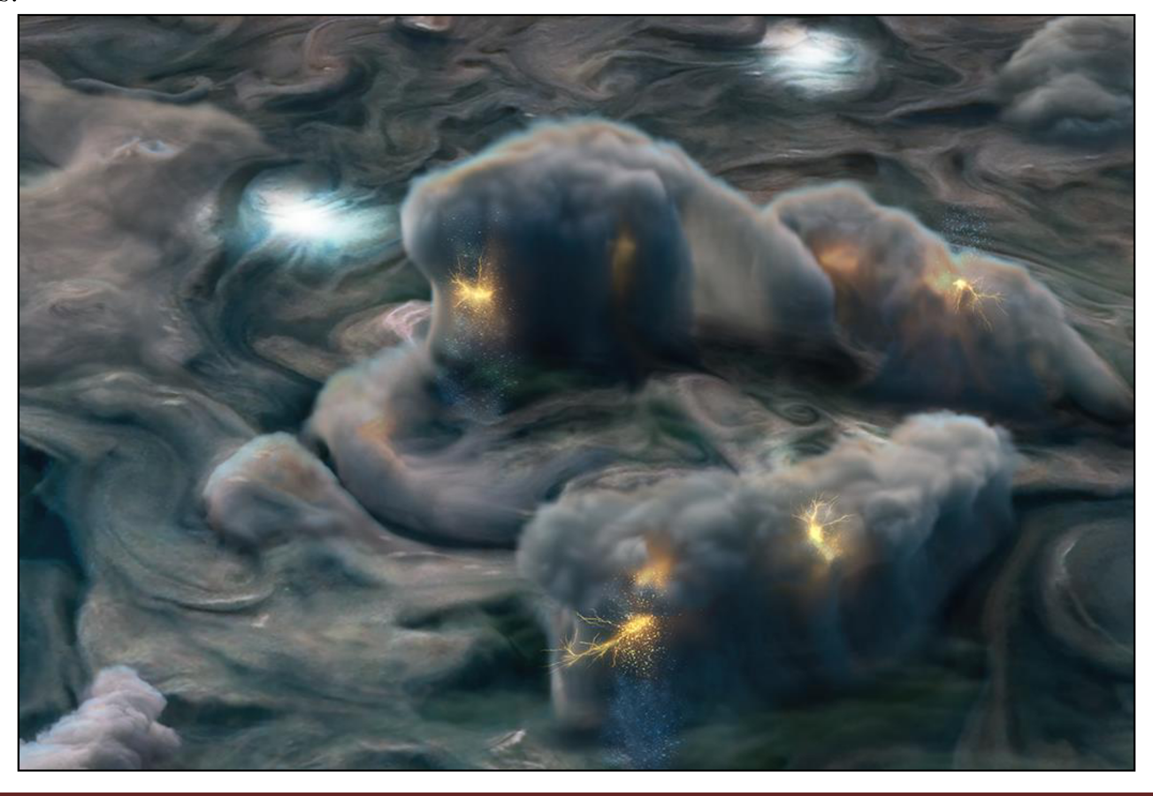


Tormentas y relámpagos

Son similares a tormentas eléctricas terrestres, se revelan a través de nubes grumosas brillantes de alrededor de 1000 Km de tamaño, que aparecen en las regiones ciclónicas de los cinturones, especialmente dentro de los fuertes chorros (retrógrados) hacia el O; a diferencia de los vórtices, las tormentas son fenómenos de corta duración; el más fuerte de ellos puede existir durante varios meses, mientras que la vida media es de sólo 3 a 4 días; se cree que se deben principalmente a la convección húmeda dentro de la troposfera de Júpiter, las tormentas son en realidad columnas convectivas altas (penachos), que llevan el aire húmedo de las profundidades a la parte superior de la troposfera, donde se condensa en nubes; una extensión vertical típica de las tormentas jovianas es de unos 100 Km; ya que se extienden desde un nivel de presión de aproximadamente 5-7 bares, donde se encuentra la base de una hipotética capa de nubes de agua, hasta tan alto como 0.2-0.5 bares.

Las tormentas en Júpiter siempre están asociadas con rayos, imágenes tomadas del hemisferio del lado nocturno de Júpiter por las naves Galileo y Cassini revelaron destellos de luz regulares en los cinturones jovianos y cerca de las ubicaciones de los chorros hacia el O, particularmente en las latitudes 51° N, 56° S y 14° S; los rayos son en promedio unas pocas veces más poderosos que los de la Tierra. Sin embargo, son menos frecuentes; la potencia de la luz emitida desde un área determinada es similar a la de la Tierra, se han detectado algunos destellos en regiones polares, lo que convierte a Júpiter en el segundo planeta conocido después de la Tierra en exhibir rayos polares.

Cada 15-17 años, Júpiter está marcado por tormentas especialmente poderosas, aparecen a 23° N de latitud, donde se ubica el chorro más fuerte hacia el E, que puede alcanzar los 540 Km/h; la última vez que se observó un evento de este tipo fue en 2007, cuando dos tormentas aparecieron en el Cinturón Templado del N con una separación de 55° de longitud, alteraron significativamente el cinturón, el material oscuro que se desprendió de las tormentas se mezcló con las nubes y cambió el color del cinturón, las tormentas se movieron con una velocidad de hasta 610 Km/h (más rápido que el propio chorro), sugiriendo la existencia de fuertes vientos en las profundidades atmosféricas.

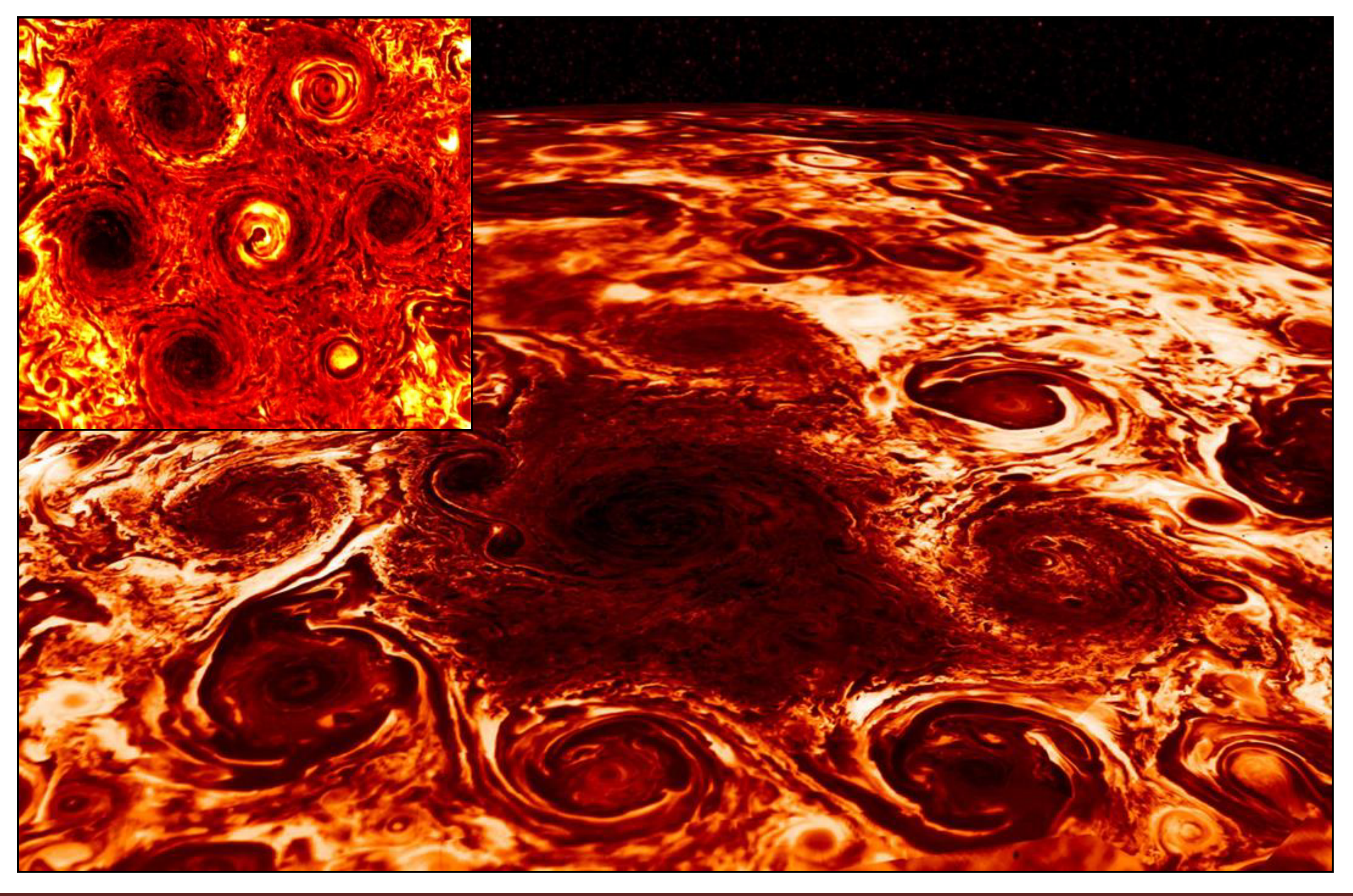


Ciclones circumpolares (CPC)

Otras características notables de Júpiter son sus ciclones cerca de los polos N y S denominados ciclones circumpolares y han sido observados por la nave espacial Juno, los ciclones solo se han observado durante un tiempo relativamente corto desde los perijoves 1-15 (aprox. 795 días), el polo N tiene 8 ciclones que se mueven alrededor de un ciclón central (NPC) mientras que el polo S tiene 5 ciclones alrededor de un ciclón central (SPC) con una brecha entre el primer y segundo ciclón.

Los ciclones circumpolares del N generalmente mantienen su forma y posición en comparación con las ciclones del polo S y esto podría deberse a las velocidades del viento más rápidas que se experimentan en el polo S, donde la velocidad media del viento ronda los 320 Km/h; aunque hay más movimiento entre los ciclones del S, tienden a retener la estructura pentagonal en relación con el polo, también se ha observado que la velocidad angular del viento aumenta a medida que se acerca al centro y el radio se vuelve más pequeño; excepto por un ciclón en el N, que puede tener rotación en la dirección opuesta, los ciclones del N tienden a mantener una estructura octagonal con respecto al NPC.

Los ciclones del S no se mueven alrededor del polo S, pero su rotación es más constante alrededor del SPC, que está desplazado del polo, la observación a corto plazo muestra que los ciclones del S se mueven aproximadamente 1,5° por perijove, que es pequeño en comparación con las velocidades del viento de los ciclones y la atmósfera turbulenta de Júpiter; los ciclones del polo S se mueven en el sentido de las agujas del reloj individualmente, pero su movimiento como una estructura pentagonal se mueve en sentido contrario a las agujas del reloj y se desplaza más hacia el O.

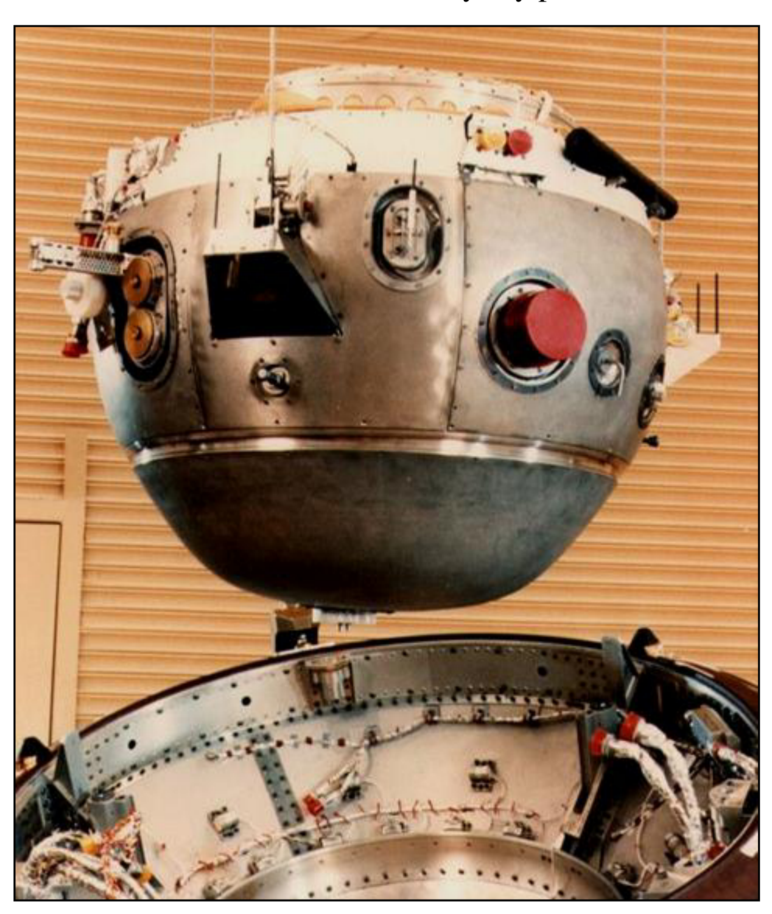


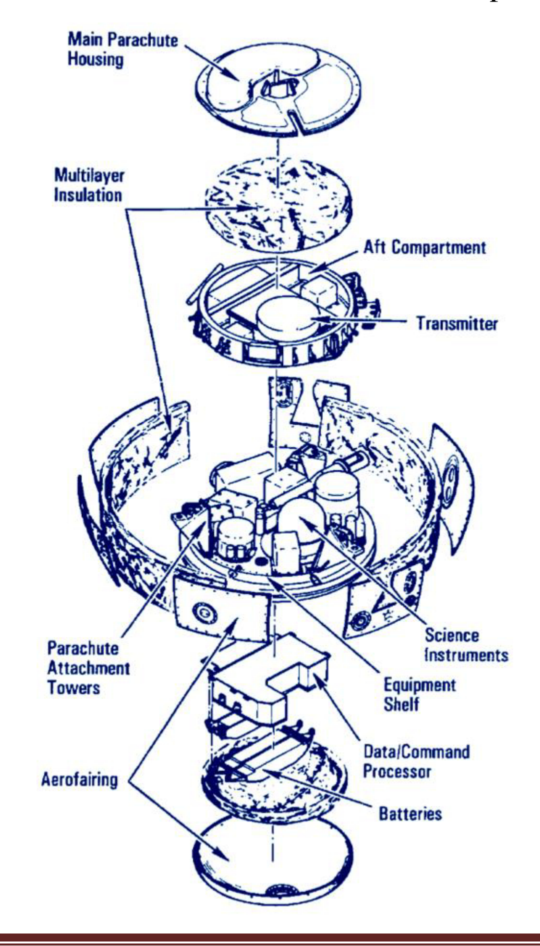
Sonda de Reentrada Atmosférica (Misión Galileo)

Marcando un hecho único en la historia de la astronáutica, la Sonda de Reentrada Atmosférica de 339 Kg de peso y 1,3m de ancho, fue lanzada desde la sonda Galileo en julio de 1995, 5 meses antes de llegar a Júpiter, entró en su atmósfera sin aerofrenado, redujo su velocidad de llegada (172000 Km/h) a una velocidad subsónica (debajo de los 1200 Km/h) en menos de 2 min., fue la reentrada atmosférica más difícil jamás intentada, la sonda tuvo que soportar 230 g y el escudo térmico perdió 80 Kg (de los 152 Kg iniciales), los instrumentos científicos estaban protegidos del calor extremo y la presión durante su viaje dentro de la atmósfera joviana a 172000 Km/h con un escudo térmico que aguantaba hasta 3900 ºC; para las radiocomunicaciones llevaba dos transmisores que operaban en banda L a 128 bits/s y enviaban señales casi idénticas de los datos científicos a la sonda Galileo; la energía de todos los componentes electrónicos estaba dada por baterías de Litio/dióxido de Azufre que proporcionaban una potencia nominal de alrededor de 580 W con una capacidad estimada de aprox. 21 A/h en su llegada a Júpiter.

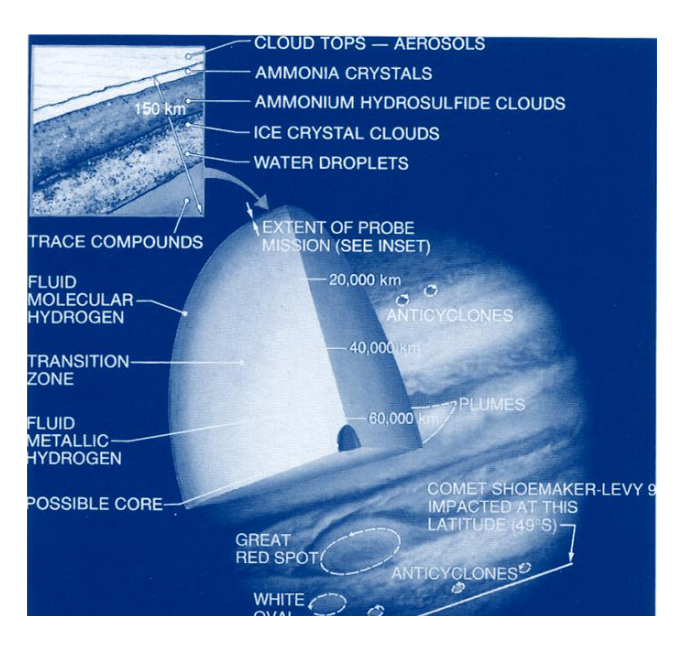
A medida descendía, a través de 163 Km de las capas superiores de la atmósfera joviana se recogieron 78 min. de datos sobre el clima local, sólo dejo de transmitir cuando la presión ambiente excedió las 23 atm (30 bares) y la temperatura alcanzó los 192 °C.

La sonda de reentrada incluía 6 instrumentos para la toma de datos en su reentrada atmosférica en Júpiter, llevaba un instrumento para el estudio de la estructura atmosférica, medición de temperatura, presión y desaceleración; espectrómetro de masa neutra; interferómetro de abundancia de helio y estudios de la composición atmosférica; nefelómetro, para ubicación y observaciones de partículas en las nubes; radiómetro neto de flujo, para medir la diferencia entre el flujo radiante hacia arriba/abajo en cada altura y un detector de partículas para medir las emisiones de radio asociadas con rayos y partículas de alta energía en los cinturones de radiación de Júpiter.





La atmósfera a través de la cual la sonda descendió fue algo más caliente y más turbulenta de lo esperado, finalmente se destruyó por completo ya que continúo el descenso a través de la capa de Hidrógeno molecular por debajo de las nubes mas altas de Júpiter, el paracaídas se derritió en primer lugar (unos 30 min. después de la reentrada) luego los componentes de Aluminio a los 40 min. de caída libre a través de un mar de Hidrógeno líquido, la sonda descubrió que Júpiter tiene la mitad de la cantidad de Helio que se esperaba, además, los datos no apoyan la teoría de tres capas de nubes, se detectaron menos rayos, menos agua y encontró vientos fuertes (530 Km/h); durante su descenso no detecto en ningún momento superficie sólida; el total de datos enviados por la sonda rondaba los 3,5 Mb; se estimó que la estructura de Titanio duró alrededor de 6,5 hrs más, antes de su desintegración debido a la alta presión; finalmente se habría vaporizado una vez que alcanzó su temperatura crítica, mezclándose sus gotas de metal con el Hidrógeno metálico líquido de Júpiter.



PROBE ENTRY
(450 km, 5 X 10-8 bar, -8°C, 0 min)

DROGUE PARACHUTE
(50 km, 0.08 bar, -160°C, 1.88 min)

MAIN PARACHUTE DEPLOYEMENT
(48 km, 0.09 bar, -161°C, 1.92 min)

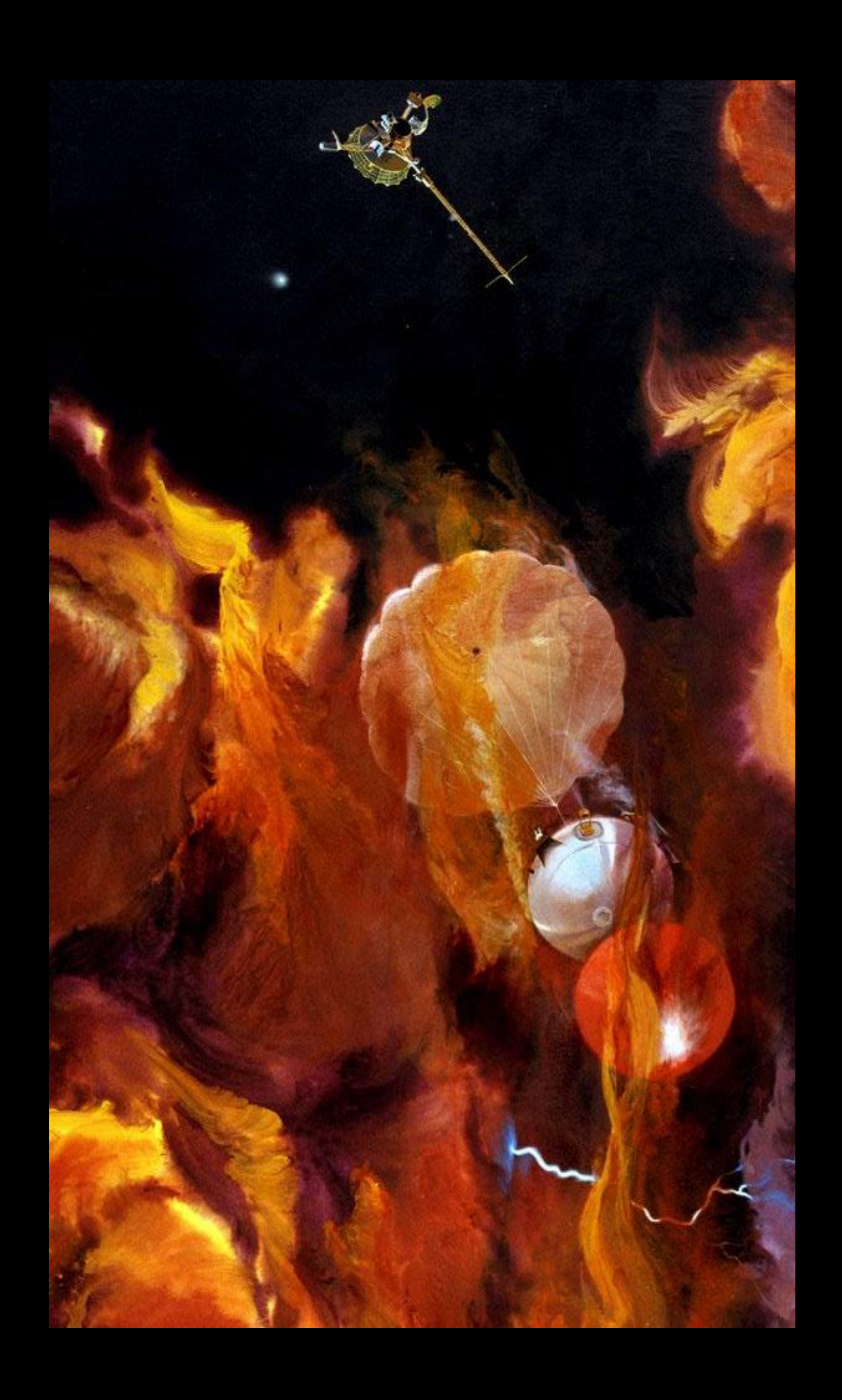
TELEMETRY TO ORBITER
(42 km, 0.13 bar, -163°C, 2.25 min)

HEAT SHIELD DROPS OFF
(45 km, 0.10 bar, -162°C, 2.05 min)

EARTH SURFACE PRESSURE
(0 km, 1.0 bar, -107°C, 8.33 min)

PRIMARY DATA REQUIREMENT
(-92 km, 10 bars, 63°C, 38 min)

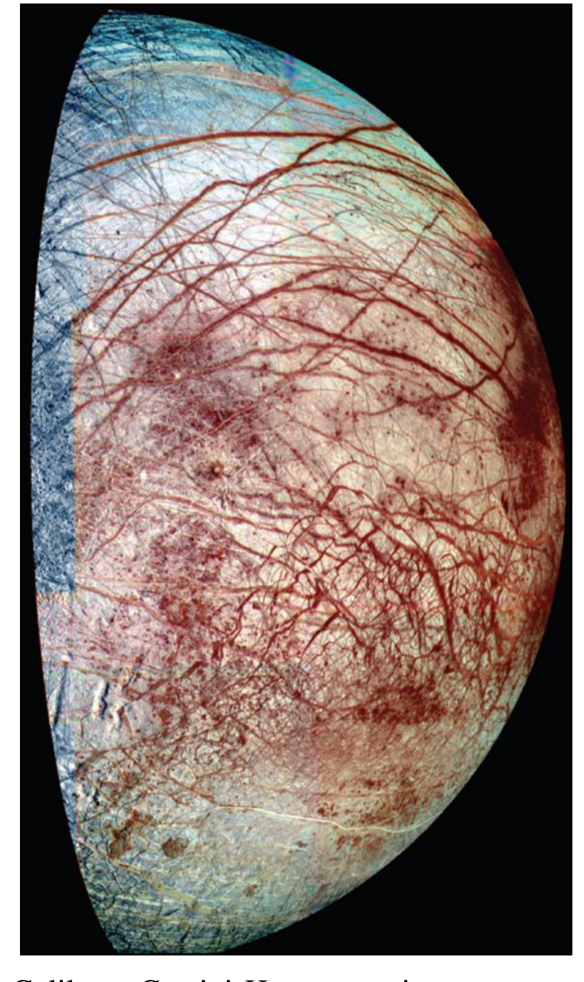
PROBE MISSION TERMINATES
(-134 km, 20 bars, 140°C, 60 min TO
-163 km, 30 bars, 192°C, 78 min)



Atmósfera de Europa (luna de Júpiter)

Observaciones realizadas en 1995 por el Telescopio Espacial Hubble descubrieron que la luna Europa tenía una atmósfera delgada de Oxígeno, y fue confirmado posteriormente por la sonda Galileo en seis experimentos en las órbitas E4 y E6 durante ocultaciones cuando Europa estaba entre la sonda Galileo y la Tierra, permitiendo a las estaciones terrestres de Goldstone (Estados Unidos) y Camberra (Australia) investigar la ionosfera de la luna y midiendo el grado en que las partículas cargadas difractaban el haz de radio, e indicando la presencia de iones de agua, que probablemente eran moléculas que habían sido desprendidas de la superficie del hielo y luego ionizadas por el Sol o la magnetosfera joviana.

En 1997, la sonda Galileo confirmó la presencia de una tenue ionosfera (una capa de partículas cargadas de la atmósfera superior) alrededor de Europa creada por la radiación solar y partículas energéticas de la magnetosfera de Júpiter, proporcionando evidencia de una atmósfera.

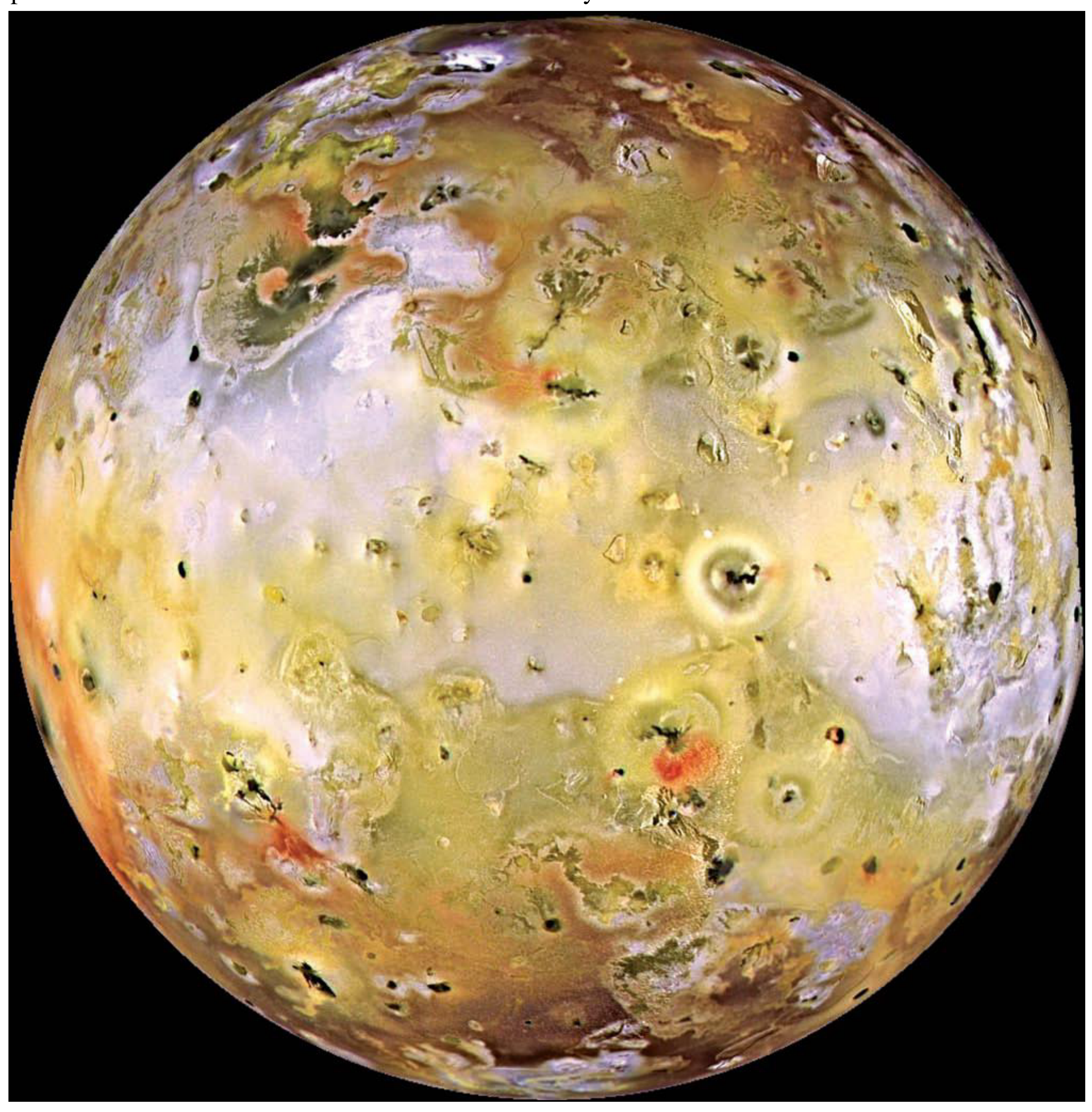


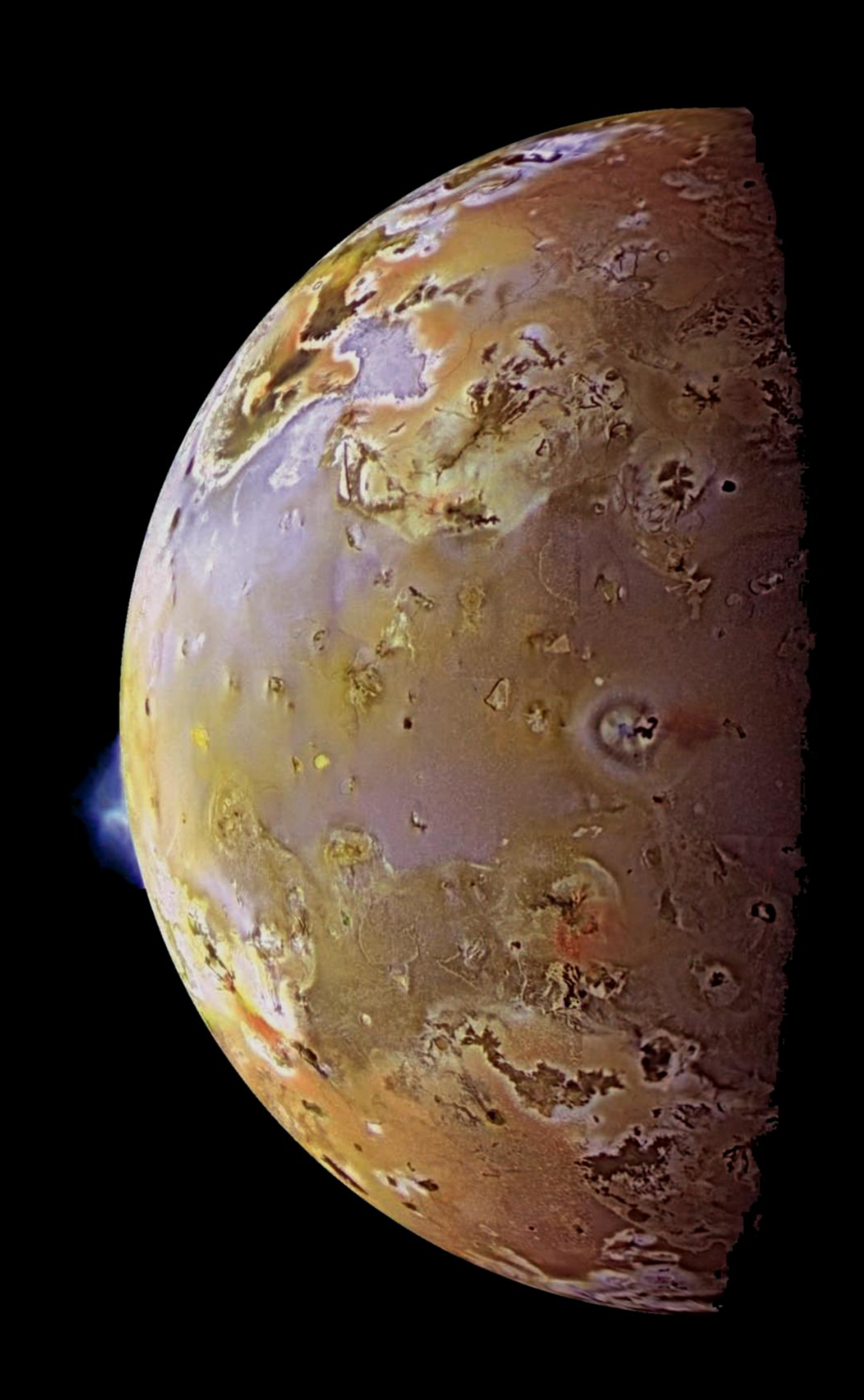
A diferencia del Oxígeno de la atmósfera terrestre, el de Europa no es de origen biológico, la atmósfera delimitada por la superficie se forma a través de la radiólisis (la disociación de moléculas a través de la radiación) la radiación UV solar y las partículas cargadas (iones y electrones) del entorno magnetosférico joviano chocan con la superficie helada de Europa, dividiendo el agua en componentes de Oxígeno e Hidrógeno, estos componentes químicos luego son absorbidos (adhesión de átomos, iones o moléculas de un gas, líquido o sólido disuelto a una superficie) y se pulverizan en la atmósfera; la misma radiación también crea eyecciones por colisión de estos productos desde la superficie, y el equilibrio de estos dos procesos forma una atmósfera, el Oxígeno molecular es el componente más denso de la atmósfera porque tiene una vida útil prolongada; después de regresar a la superficie, no se pega (se congela) como una molécula de agua o peróxido de Hidrógeno, sino que se aleja de la superficie y comienza otro arco balístico, el Hidrógeno molecular nunca llega a la superficie, ya que es lo suficientemente ligero como para escapar de la gravedad de la superficie, observaciones de la superficie han revelado que parte del Oxígeno molecular producido por la radiólisis no se expulsa de la misma debido a que puede interactuar con el océano subsuperficial, este Oxígeno molecular puede llegar al océano, donde podría ayudar en los procesos biológicos; el Hidrógeno molecular que escapa de la gravedad de Europa, junto con el Oxígeno atómico y molecular, forma un toro de gas en las proximidades de la órbita de Europa alrededor de Júpiter, esta nube neutra ha sido detectada por las naves Galileo y Cassini-Huygens y tiene un mayor contenido (número de átomos y moléculas) que la nube neutra que rodea la luna Io, los modelos predicen que casi todos los átomos o moléculas del toro de Europa se ionizan eventualmente, proporcionando así una fuente para el plasma magnetosférico de Júpiter.

La presencia de una ionosfera fue suficiente para deducir la existencia de una atmósfera delgada en Europa, el 11-12-2013, la NASA informó (basándose en resultados de la misión Galileo) la detección de minerales arcillosos (específicamente, filosilicatos a menudo asociados con materiales orgánicos) en la corteza helada de Europa, la presencia de los minerales puede haber sido el resultado de una colisión con un asteroide o un cometa.

Atmósfera de Ío (luna de Júpiter)

Un interesante fenómeno en lo parece ser la presencia de manchas brillantes blancas o blanco-azuladas sobre escarpaduras y fallas observadas en muchas zonas, pero particularmente en la región polar meridional, tales características son difusas, algunas veces variables, enmascarando la superficie subyacente, por lo que se sugirió que podrían ser nubes (o materia depositada procedente de nubes) producidas por un gas que se escapaba del interior del satélite y se condensaba formando alguna clase de nieve, una de las observaciones clave condujo a una explicación provisional de los penachos como de las manchas blancas, el descubrimiento por miembros del grupo del experimento IR/Voyager de que Io tiene una tenue atmósfera de dióxido de azufre; a partir de medidas de absorción en el IR se estimó que durante el día esta atmósfera tiene una presión de alrededor de 0,10 mbar un análisis espectrofotométrico de las imágenes de las sondas Voyager mostraron que las grandes regiones de color blanco pueden ser una mitad escarcha de dióxido de Azufre y la otra mitad Azufre.

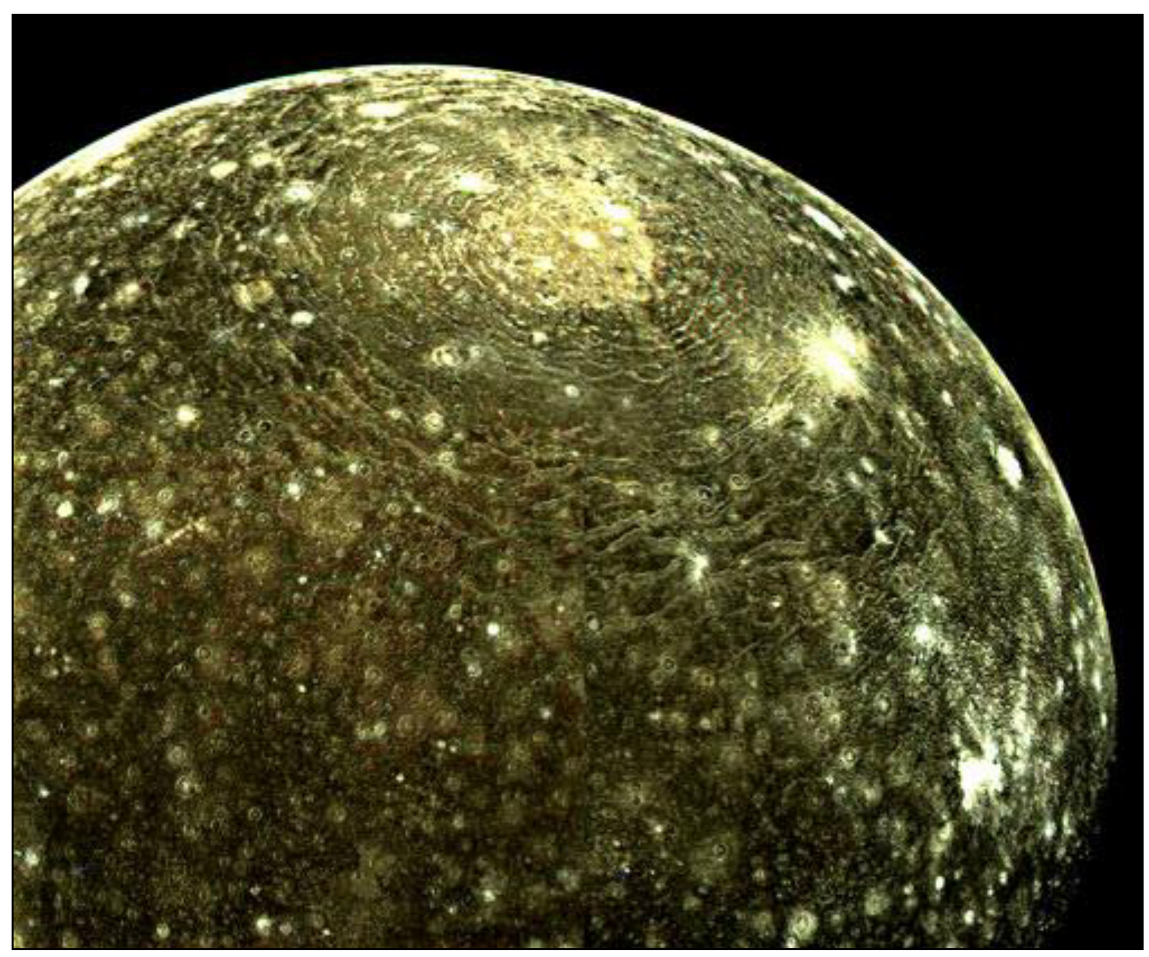




Atmósfera de Calixto (luna de Júpiter)

Compuesta de dióxido de Carbono, Calixto posee una atmósfera muy tenue, detectada por el Espectrómetro de Mapeo de IR Cercano (NIMS) de la sonda Galileo a partir de su característica de absorción cerca de la longitud de onda de 4,2 micrómetros; se estima que la presión superficial es de 7,5 pico bar, y la densidad de $4x10^8$ partículas x cm^{-3}; debido a que una atmósfera tan fina se perdería en solo unos 4 días, debe reponerse de manera constante, posiblemente mediante la sublimación lenta del hielo de dióxido de Carbono de su corteza helada, lo que sería compatible con la hipótesis de sublimación/degradación para la formación de las protuberancias en su superficie.

La ionosfera se detectó por primera vez durante los sobrevuelos de la sonda espacial Galileo; su alta densidad de electrones no puede explicarse por la fotoionización del dióxido de Carbono atmosférico solo, se sospecha que la atmósfera en realidad está dominada por Oxígeno molecular (cantidades de 10-100 veces mayores que el Carbono)



No se detectó Oxígeno directamente en la atmósfera, observaciones realizadas con el Telescopio Espacial Hubble colocaron un límite superior a su posible concentración en la atmósfera, basado en la falta de detección, que aún es compatible con las mediciones ionosféricas; al mismo tiempo, pudo detectar Oxígeno condensado atrapado en la superficie; también se ha detectado Hidrógeno atómico en la atmósfera a través de un análisis reciente de los datos del Telescopio Espacial Hubble en 2001.

Las imágenes espectrales tomadas el 15 y 24-12-2001 fueron reexaminadas, revelando una débil señal de luz dispersa que indica una corona de Hidrógeno, que es dos veces mayor cuando se observa el hemisferio delantero, esta asimetría puede tener su origen en una abundancia de Hidrógeno diferente en los hemisferios anterior y posterior.

Atmósfera de Ganímedes (luna de Júpiter)

Un equipo de astrónomos indios, británicos y estadounidenses, en 1972, afirmaron haber detectado una atmósfera tenue durante una ocultación, cuando ésta y Júpiter pasaban por delante de una estrella, estimaron que la presión superficial era de alrededor de 1 mbar. Sin embargo, en 1979, la sonda Voyager 1 observó una ocultación de la estrella K Centauri durante su sobrevuelo de Júpiter, con resultados diferentes, las mediciones de ocultación se realizaron en el espectro UV lejano en longitudes de onda inferiores a 200 nm, que eran mucho más sensibles a la presencia de gases que las mediciones realizadas en 1972 en el espectro visible, los datos de la sonda Voyager 1 no revelaron ninguna atmósfera.

A pesar de los datos de la sonda Voyager 1, el Telescopio Espacial Hubble encontró evidencia de una tenue atmósfera de Oxígeno (exosfera) en Ganímedes, muy similar a la encontrada en Europa en 1995; en realidad observó el brillo del aire de Oxígeno atómico en el UV lejano en las longitudes de onda de 130,4 nm y 135,6 nm; tal resplandor del aire se excita cuando el Oxígeno molecular se disocia mediante impactos de electrones, lo que es evidencia de una atmósfera neutra significativa compuesta predominantemente de moléculas de Oxígeno.

La existencia de una atmósfera neutra implica que debería existir una ionosfera, ya que las moléculas Oxígeno se ionizan por los impactos de los electrones energéticos provenientes de la magnetosfera y por la radiación solar UV. Sin embargo, la naturaleza de la ionosfera de Ganímedes es tan controvertida como la naturaleza de su atmósfera; algunas mediciones de la sonda Galileo encontraron una elevada densidad electrónica cerca de la luna, lo que sugiere una ionosfera, mientras que otras no lograron detectar nada; diferentes fuentes estiman que la densidad de electrones cerca de la superficie en el rango de 400 a 2500 cm^{-3}; en 2008, los parámetros de la ionosfera de Ganímedes no estaban bien limitados.



Pruebas adicionales de la atmósfera de Oxígeno provienen de la detección espectral de gases atrapados en el hielo en la superficie de Ganímedes, la detección de bandas de ozono se anunció en 1996; en 1997, el análisis espectroscópico reveló las características de absorción dímera (o diatómica) del Oxígeno molecular, esta absorción sólo puede producirse si el Oxígeno se encuentra en una fase densa; el mejor candidato es el Oxígeno molecular atrapado en el hielo.

La profundidad de las bandas de absorción del dímero depende de la latitud y la longitud, más que del albedo de la superficie; tienden a disminuir al aumentar la latitud en Ganímedes, mientras que el ozono muestra una tendencia opuesta.

Una búsqueda de Sodio en la atmósfera, no arrojó nada en 1997, el Sodio es mucho menos abundante alrededor de Ganímedes, posiblemente debido a una deficiencia relativa en la superficie o porque la magnetosfera se defiende de partículas energéticas; otro componente menor de la atmósfera es el Hidrógeno atómico; se observaron átomos de Hidrógeno hasta a 3000 Km de la superficie; en 2021 se detectó vapor de H_2O en su atmósfera.

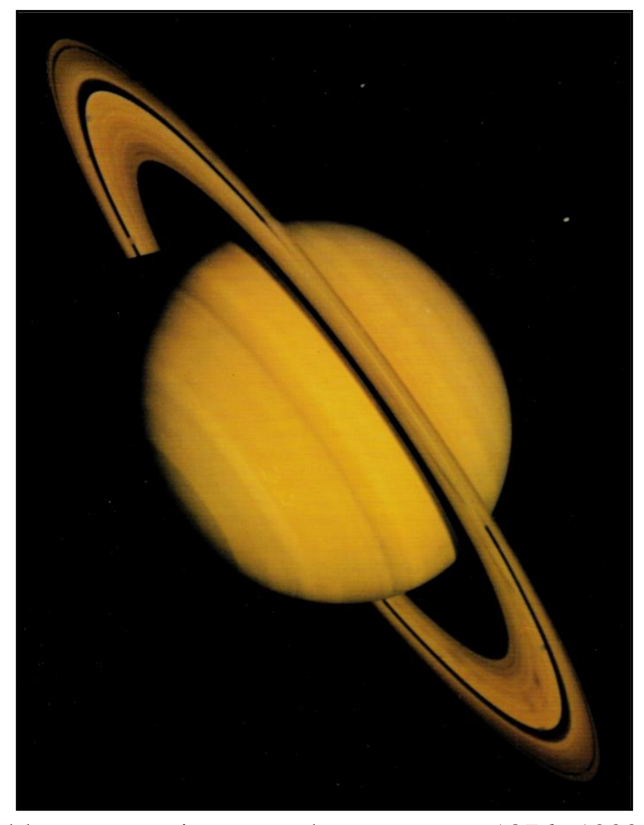
Atmósfera de Saturno

La atmósfera exterior de Saturno contiene 96,3% de Hidrógeno molecular y 3,25% de Helio en volumen. La proporción de helio es significativamente deficiente en comparación con la abundancia de este elemento en el Sol. La cantidad de elementos más pesados que el Helio (metalicidad) no se conoce con precisión, pero se supone que las proporciones coinciden con las abundancias primordiales de la formación del Sistema Solar. Se estima que la masa total de estos elementos más pesados es de 19 a 31 veces la masa de la Tierra, con una fracción significativa ubicada en la región del núcleo de Saturno.

Se han detectado trazas de Amoníaco, Acetileno, Etano, Propano, fosfina y metano en la atmósfera de Saturno. Las nubes superiores están compuestas de cristales de amoniaco, mientras que las nubes de los niveles inferiores parecen estar formadas por hidrosulfuro de amonio o agua, la radiación UV del Sol causa fotólisis del metano en la atmósfera superior, lo que lleva a una serie de reacciones químicas de hidrocarburos con los productos resultantes transportados hacia abajo por remolinos y difusión; este ciclo fotoquímico está modulado por el ciclo estacional anual de Saturno.

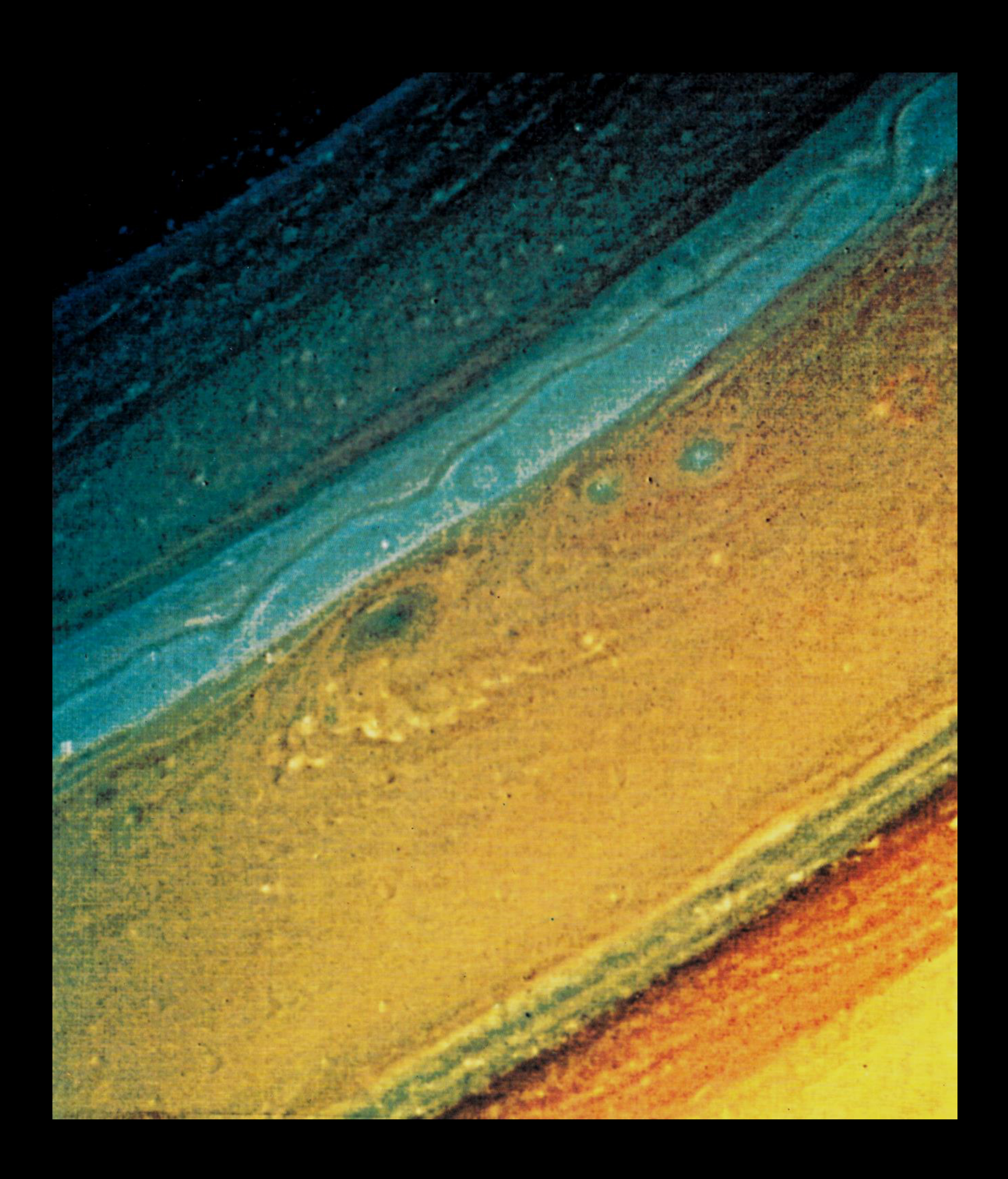
Capas de nubes

La atmósfera de Saturno exhibe un patrón de bandas similar al de Júpiter, pero las bandas de Saturno son mucho más débiles y más anchas cerca del ecuador; la nomenclatura utilizada para describir estas bandas es la misma que en Júpiter, los patrones de nubes más finos de Saturno no se observaron hasta los sobrevuelos de la nave Voyager en la década de 1980.



La composición de las nubes varía con la profundidad y el aumento de la presión, en las capas superiores de nubes, con una temperatura en el rango de -173 a 113 °C y presiones que se extienden entre 0,5 y 2 bares, las nubes están formadas por hielo de amoniaco; las nubes de hielo de agua comienzan a un nivel en el que la presión es de aproximadamente 2,5 bares y se extienden hasta los 9,5 bares, donde las temperaturas oscilan entre -88 y -3 °C; entremezclada en esta capa hay una banda de hielo de hidrosulfuro de amonio, que se encuentra en el rango de presión de 3 a 6 bares con temperaturas de -83 y -38 °C; las capas inferiores, donde las presiones están entre 10 y 20 bares y las temperaturas son de -3 y 56 °C, contienen una región de gotas de agua con amoniaco en solución acuosa.

La atmósfera generalmente suave de Saturno exhibe ocasionalmente óvalos de larga duración y características comunes en Júpiter; en 1990, el Telescopio Espacial Hubble tomó imágenes de una nube blanca cerca del ecuador de Saturno que no estaba presente durante los sobrevuelos de la sonda Voyager, fue un ejemplo de Gran Mancha Blanca, fenómeno único pero de corta duración que ocurre una vez cada año de Saturno (30 años terrestres, alrededor de la época del solsticio de verano del hemisferio N, las grandes manchas blancas anteriores se observaron en 1876, 1903, 1933 y 1960, siendo la tormenta de 1933 la más famosa, en 1994 se observó otra tormenta más pequeña.



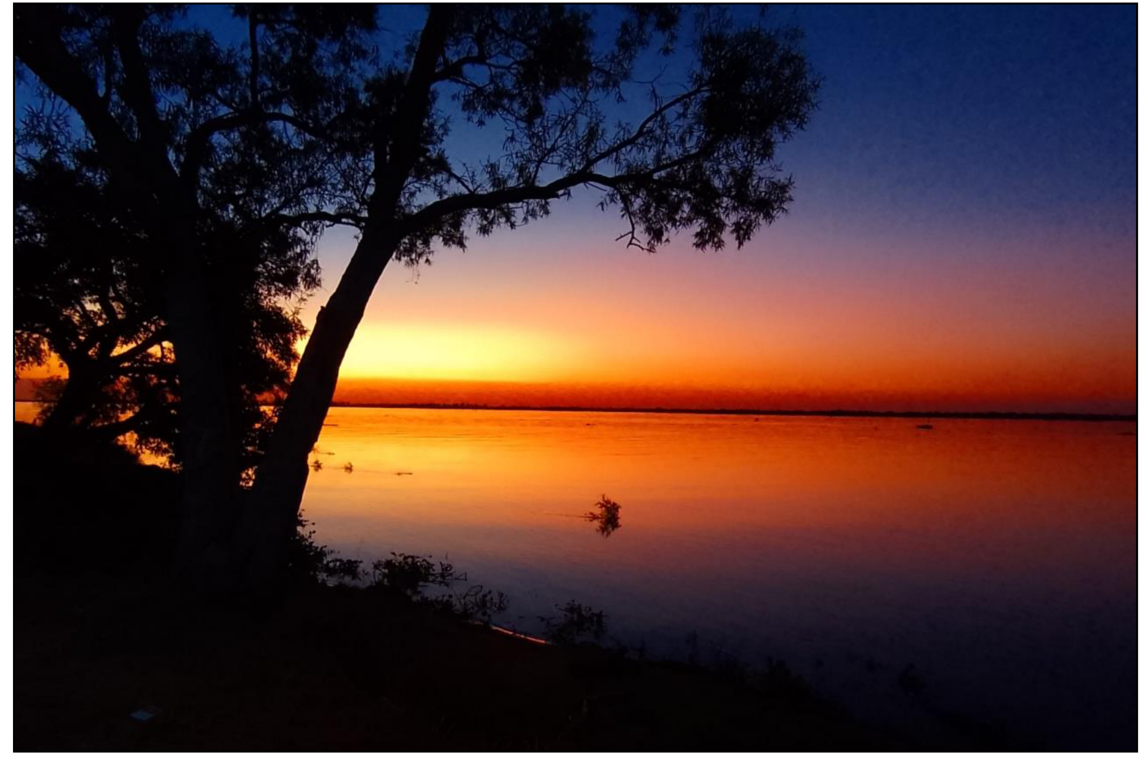
Vientos

Los vientos en Saturno, después de Neptuno son los más rápidos entre los planetas del Sistema Solar; datos de la sonda Voyager indicaron vientos máximos del E de 1800 Km/h; durante 2007, en imágenes de la sonda Cassini, el hemisferio N de Saturno mostró un tono azul brillante, lo más probable es que el color se deba a la dispersión Rayleigh, la termografía demostró que el polo S tiene un vórtice polar cálido, el único ejemplo conocido de tal fenómeno en el Sistema Solar.

Dispersión Rayleigh

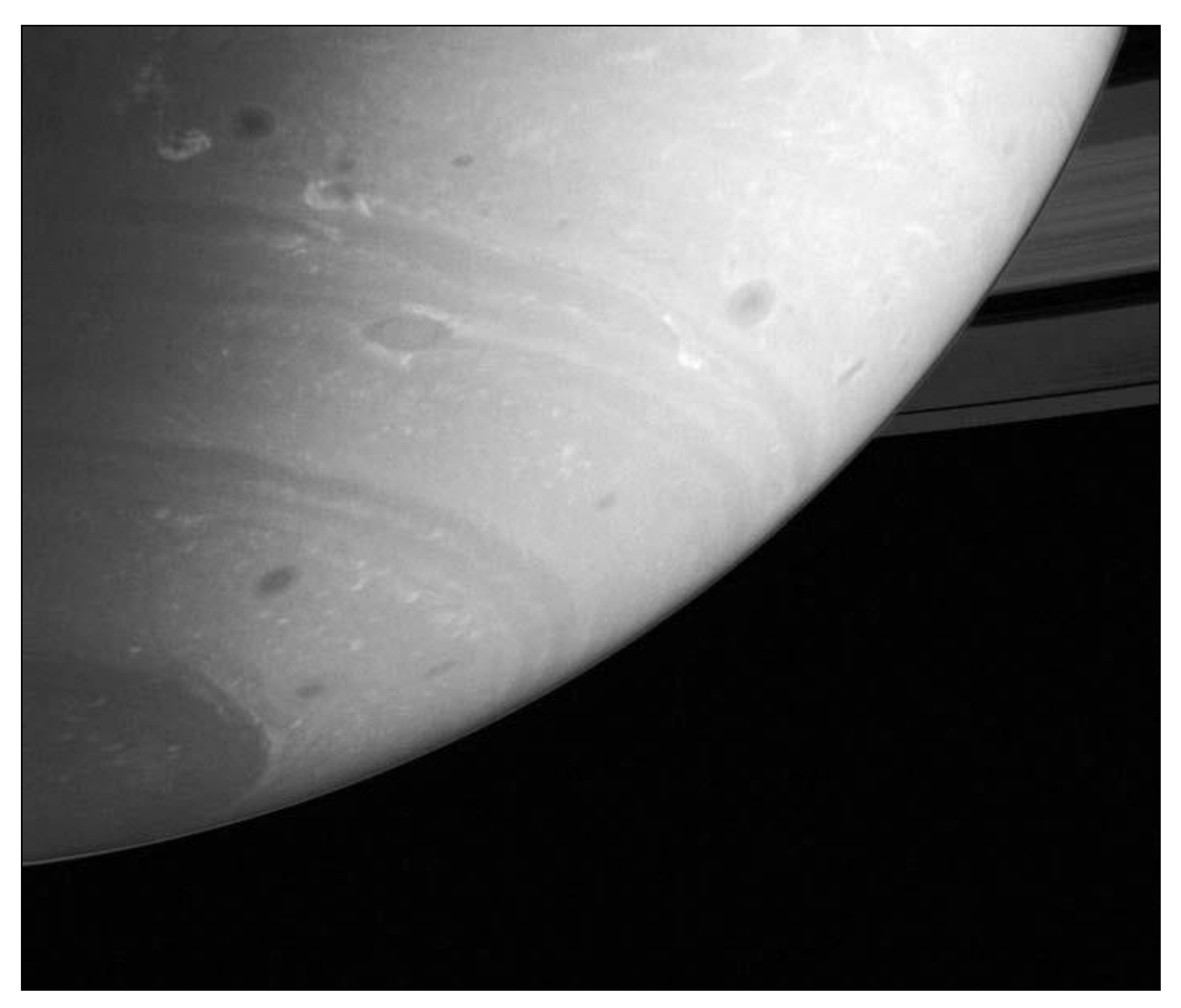
Es la dispersión de la luz visible o cualquier otra radiación electromagnética por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de los fotones dispersados; ocurre cuando la luz viaja por sólidos y fluidos transparentes, pero se ve con mayor frecuencia en los gases, la dispersión Rayleigh de la luz solar en la atmósfera es la principal razón de que el cielo se vea azul.

La fuerte dependencia de la dispersión con la longitud de onda supone que en la atmósfera la luz azul y violeta de longitud de onda más corta se dispersará más que las longitudes de onda más larga (amarilla y roja), esto provoca que los fotones de luz azul se dispersen mucho más que los de longitudes de onda mayores a 490 nm; por este motivo en la atmósfera terrestre vemos el cielo azulado en todas direcciones (que en realidad es una mezcla de todos los colores dispersos, principalmente azul y verde) y solo lo vemos enrojecido cuando el Sol se encuentra próximo al horizonte, debido a que la luz atraviesa mucho más espesor de atmósfera más cercana a la superficie terrestre, donde es más densa y los rayos que nos llegan están muy empobrecidos en fotones de luz de longitud de onda más corta (azul) y de longitud de onda media (verde), previamente dispersados de la ruta directa del observador, por lo tanto, la luz restante no dispersada es principalmente de longitudes de onda más larga y parece más roja.

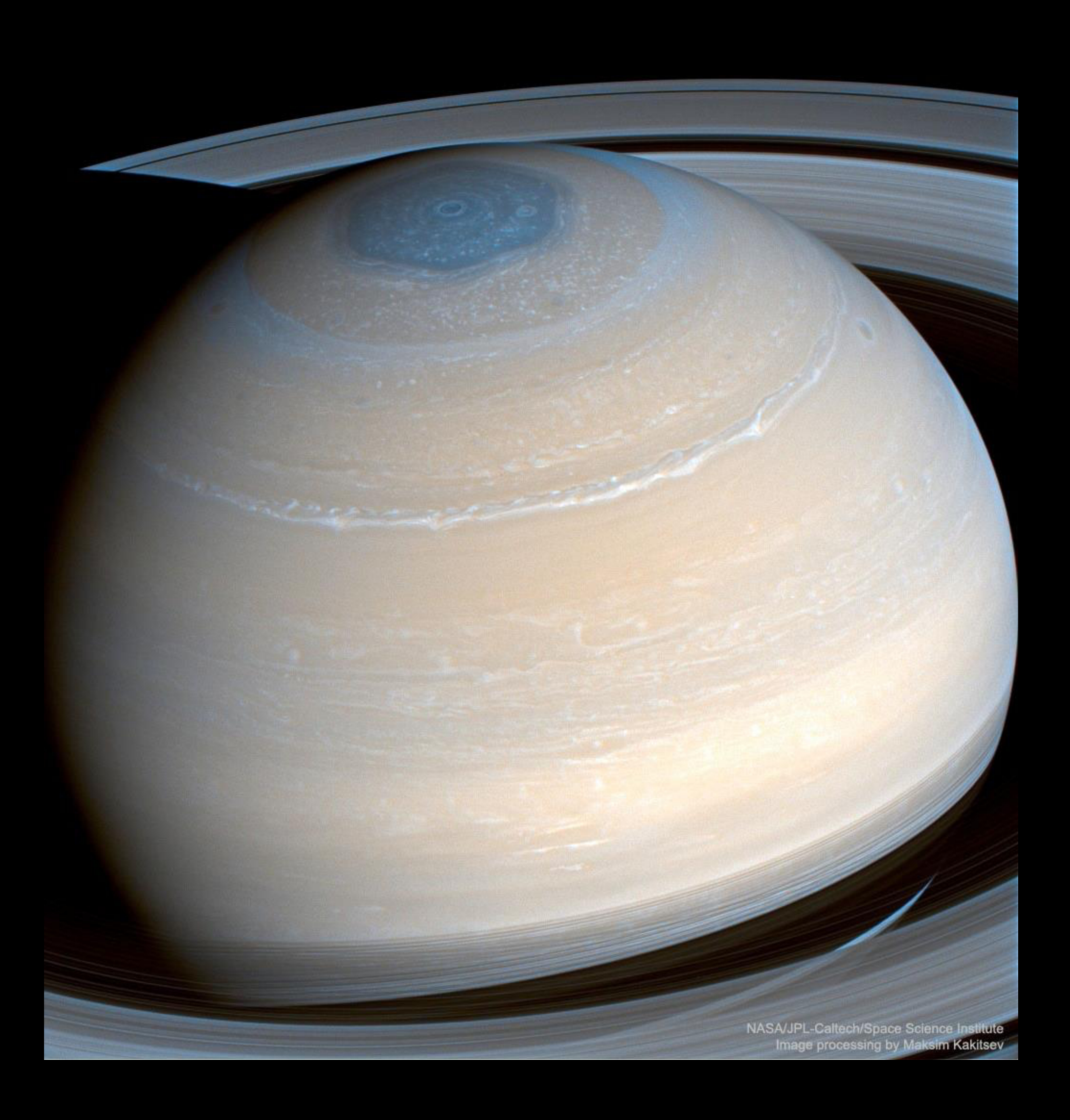




Imágenes tomadas por el Telescopio Espacial Hubble (HST) de la región del polo S indicaron la presencia de una corriente en chorro, pero no un vórtice polar ni onda estacionaria hexagonal, la sonda Cassini-Huygens, en 2006 observó una tormenta de características similares a un huracán con vientos de 550 Km/h encerrada en el polo S que tenía nubes en la pared del ojo claramente definidas que no se habían visto previamente en ningún otro planeta que no fuera la Tierra.



En imágenes enviadas por la sonda Voyager se observó por primera vez un patrón de onda hexagonal persistente alrededor del vórtice del polo N en la atmósfera a unos 78° N, los lados del hexágono tienen aproximadamente 13800 Km de largo, toda la estructura gira con un período de 10:39:24 (el mismo período que el de las emisiones de radio del planeta) que se supone que es igual al período de rotación del interior de Saturno; la característica hexagonal no cambia de longitud como las otras nubes en la atmósfera visible, el origen del patrón es un tema de mucha especulación, la mayoría de los científicos creen que es un patrón de ondas estacionarias en la atmósfera; mientras que las temperaturas en Saturno son normalmente de -185° C, las temperaturas en el vórtice a menudo alcanzan hasta -122° C, y se cree que es el lugar más cálido de Saturno.


NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute
Image processing by Maksim Kakitsev

Magnetosfera

El campo magnético interno desvía el viento solar, una corriente de partículas ionizadas emitidas por el Sol, lejos de su superficie, impidiendo que interactúe directamente con su atmósfera y creando en cambio su propia región, llamada magnetosfera, compuesta por un plasma muy diferente a el del viento solar; la magnetosfera de Saturno es la segunda magnetosfera más grande del Sistema Solar después de la de Júpiter.

Al igual que con la magnetosfera de la Tierra, el límite que separa el plasma del viento solar del que se encuentra dentro de la magnetosfera de Saturno se llama magnetopausa, la distancia de la magnetopausa desde el centro del planeta en el punto subsolar varía ampliamente de 965000 a 1,7 millones de Km.

La posición de la magnetopausa depende de la presión ejercida por el viento solar, que a su vez depende de la actividad solar, la distancia de separación de la magnetopausa promedio es de aprox. 1327000 Km; frente a la magnetopausa (aprox. 1,7 millones de Km del planeta) se encuentra el arco de choque, que es una perturbación similar a una estela en el viento solar causada por su colisión con la magnetosfera, la región entre el arco de choque y la magnetopausa se llama vaina magnética.

En el lado opuesto del planeta, el viento solar extiende las líneas del campo magnético de Saturno en una larga cola magnética, que consta de dos lóbulos, con el campo magnético en el lóbulo N apuntando en dirección opuesta a Saturno y el S apuntando hacia él, los lóbulos están separados por una capa delgada de plasma llamada hoja de corriente de la cola, como la de la Tierra, la cola de Saturno es un canal a través del cual el plasma solar ingresa a las regiones internas de la magnetosfera; similar a Júpiter; la cola es el conducto a través del cual el plasma del origen magnetosférico interno sale de la magnetosfera; el plasma que se mueve desde la cola hasta la magnetosfera interior se calienta y forma una serie de cinturones de radiación.

Los procesos que impulsan la magnetosfera de Saturno son similares a los que impulsan la Tierra y Júpiter, la magnetosfera de Saturno está dominada por la co-rotación del plasma y la carga de masa de la luna Encelado. Sin embargo, la magnetosfera de Saturno es mucho más pequeña en tamaño, mientras que su región interior contiene muy poco plasma para distenderlo seriamente y crear un gran magnetodisco; está mucho más influenciado por el viento solar y que, al igual que el campo magnético de la Tierra, su dinámica se ve afectada por la reconexión con el viento solar.

Otra característica distintiva de la magnetosfera de Saturno es la gran abundancia de gas neutro alrededor del planeta (como reveló la observación UV de la sonda Cassini-Huygens), el planeta está envuelto en una gran nube de vapor de H_2O, Hidrógeno y sus productos disociativos como el hidroxilo, que se extiende hasta los 2,7 millones de Km desde Saturno; en la magnetosfera interior, la proporción de neutrales a iones es de alrededor de 60 y aumenta en la magnetosfera exterior, lo que significa que todo el volumen magnetosférico está lleno de gas relativamente denso y débilmente ionizado.

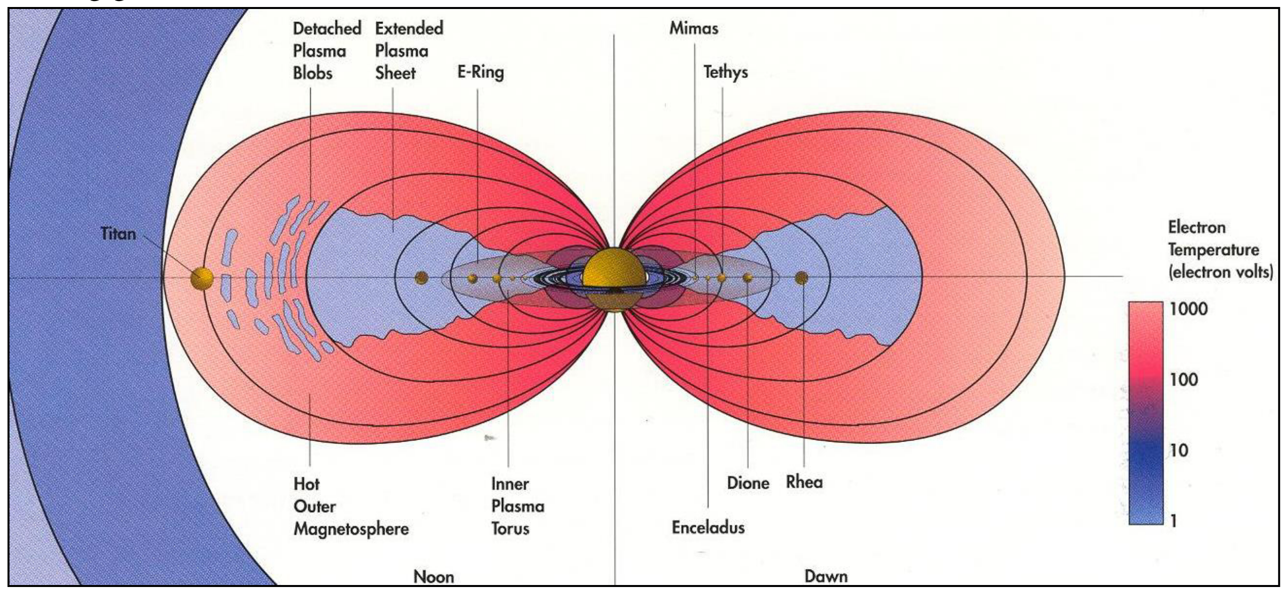
La composición del plasma en la magnetosfera interna de Saturno está dominada por los iones del grupo agua y otros, protones y también están presentes iones de Nitrógeno, la principal fuente de H_2O es Encelado, que libera entre 300 y 600 Kg/s de vapor de agua de los géiseres cerca de su polo S; el agua liberada y los radicales hidroxilo forman un toro alrededor de la órbita de la luna con densidades de hasta 10000 moléculas/cm^3 cúbico; al menos 100 Kg/s de esta agua se ionizan y se agregan al plasma magnetosférico co-rotante; fuentes adicionales de iones del grupo de agua son los anillos y otras lunas heladas.

Saturno tiene un campo magnético intrínseco que tiene una forma simple y simétrica: un dipolo magnético, su fuerza en el ecuador es de -0,2 gauss (aproximadamente una vigésima parte de la del campo alrededor de Júpiter y ligeramente más débil que el campo magnético terrestre; como resultado, la magnetosfera de Saturno es mucho más pequeña que la de Júpiter; cuando la sonda Voyager 2 entró en la magnetosfera, la presión del viento solar era alta y la magnetosfera se extendía 1,1 millones de Km, aunque se agrandó en varias hrs, y permaneció así durante aprox. 3 días; lo más probable es que el campo magnético se genere de manera similar al de Júpiter, por las corrientes en la capa de Hidrógeno metálico líquido llamada dínamo de Hidrógeno metálico, esta magnetosfera es eficiente para desviar las partículas del viento solar; la luna Titán orbita dentro de la parte exterior de la magnetosfera de Saturno y aporta plasma de las partículas ionizadas en la atmósfera exterior de la luna Titán; la magnetosfera de Saturno (como la terrestre), produce auroras.

La magnetosfera de Saturno a menudo se divide en cuatro regiones, la región más interna está ubicada junto con los anillos planetarios de Saturno, tiene un campo magnético estrictamente dipolar, en gran parte carece de plasma, que es absorbido por las partículas de los anillos, aunque los cinturones de radiación de Saturno se encuentran en esta región más interna, justo dentro y fuera de los anillos.

La segunda región contiene el toro de plasma frío y se llama magnetosfera interna, contiene el plasma más denso del sistema saturnino, el plasma en el toro se origina en las lunas heladas internas, particularmente en Encelado (el campo magnético en esta región también es principalmente dipolar); la tercera región se denomina hoja de plasma dinámica y extendida, el campo magnético en esta región es estirado y no dipolar, mientras que el plasma está confinado a una delgada lámina de plasma ecuatorial; la cuarta región ultraperiférica se encuentra en latitudes altas y continúa hasta el límite de la magnetopausa, se caracteriza por una baja densidad de plasma y un campo magnético variable no dipolar fuertemente influenciado por el viento solar.

En las partes externas de la magnetosfera de Saturno, el campo magnético cerca del plano ecuatorial está muy estirado y forma una estructura en forma de disco llamada magnetodisco, el disco continúa hasta la magnetopausa en el lado diurno y pasa a la cola magnética en el lado nocturno; cerca del lado diurno puede estar ausente cuando la magnetosfera es comprimida por el viento solar, en el lado nocturno y los flancos de la magnetosfera, el magnetodisco siempre está presente; la hoja de plasma en la magnetosfera de Saturno tiene una forma de cuenco que no se encuentra en ninguna otra magnetosfera conocida; mediciones del campo magnético y la densidad del plasma revelaron que la hoja de plasma estaba deformada y se encontraba al N del plano ecuatorial con el aspecto de un cuenco gigante.

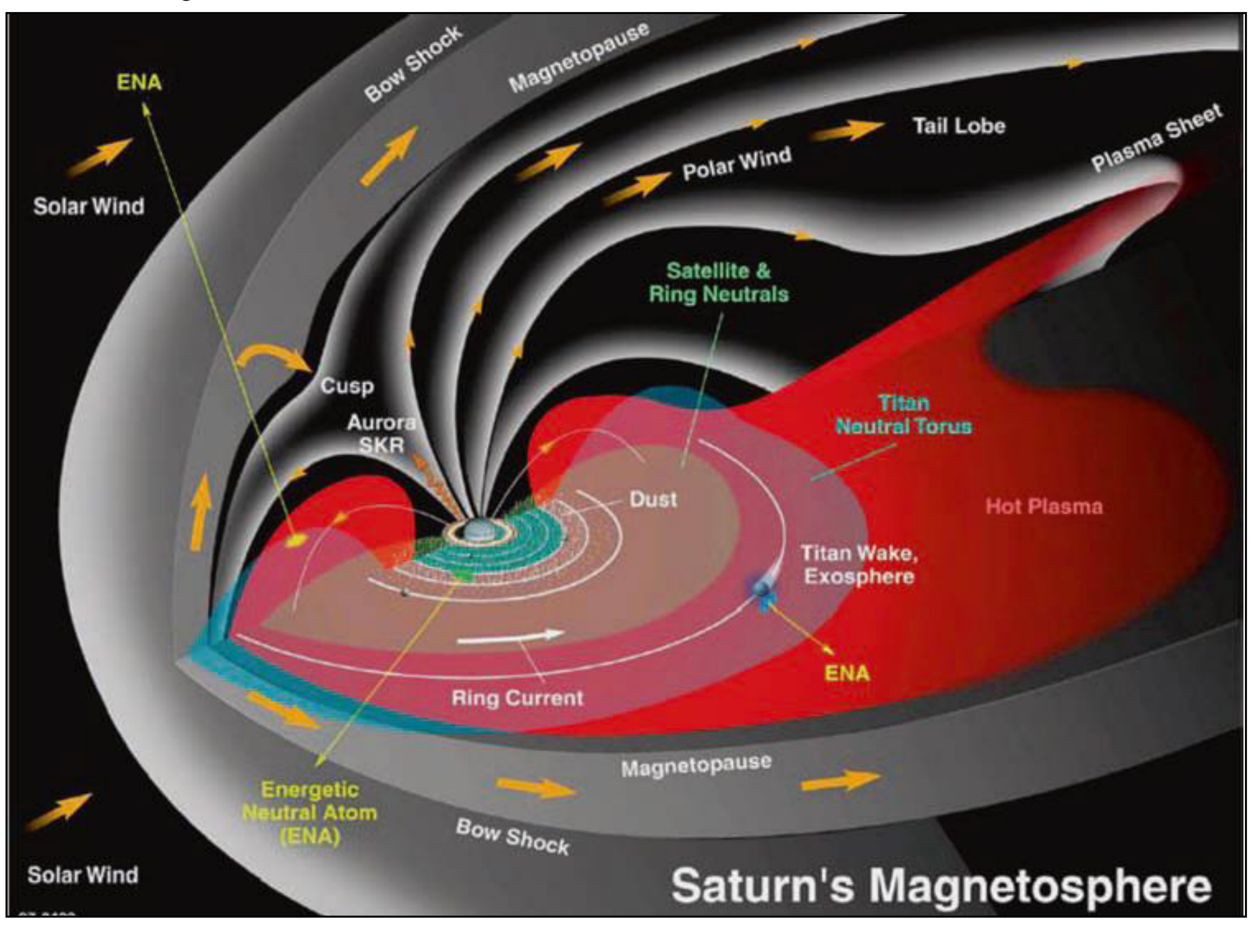


En las partes externas de la magnetosfera, los iones dominantes son los protones, que se originan en el viento solar o en la ionosfera de Saturno, el plasma relativamente frío en la región más interna de la magnetosfera de Saturno (cerca de los anillos) consiste principalmente en iones de Oxígeno, éstos junto con los electrones forman una ionosfera que rodea los anillos de Saturno.

Tanto para Júpiter como para Saturno, se cree que el transporte de plasma desde el interior hacia el exterior de la magnetosfera está relacionado con la inestabilidad del intercambio. En el caso de Saturno, los tubos de flujo magnético cargados con plasma frío rico en agua se intercambian con tubos de flujo llenos de plasma caliente que llega desde la magnetosfera exterior, la inestabilidad es impulsada por la fuerza centrífuga ejercida por el plasma sobre el campo magnético.

El plasma frío finalmente es eliminado de la magnetosfera por los plasmoides formados cuando el campo magnético se reconecta en la cola magnética; los plasmoides bajan por la cola y escapan de la magnetosfera, se cree que el proceso de reconexión o subtormenta está bajo el control del viento solar y Titán, que orbita cerca del límite exterior de la magnetosfera.

En la región del magnetodisco, el plasma dentro de la hoja co-giratoria ejerce una fuerza centrífuga significativa sobre el campo magnético, lo que hace que se estire; esta interacción crea una corriente en el plano ecuatorial que fluye azimutalmente con rotación y se extiende desde el planeta, la corriente de anillo en la magnetosfera de Saturno es muy variable y depende de la presión del viento solar, siendo más fuerte cuando la presión es más débil, el momento magnético asociado con esta corriente ligeramente deprime el campo magnético en la magnetosfera interna, aunque aumenta el momento magnético total del planeta y hace que el tamaño de la magnetosfera sea más grande.

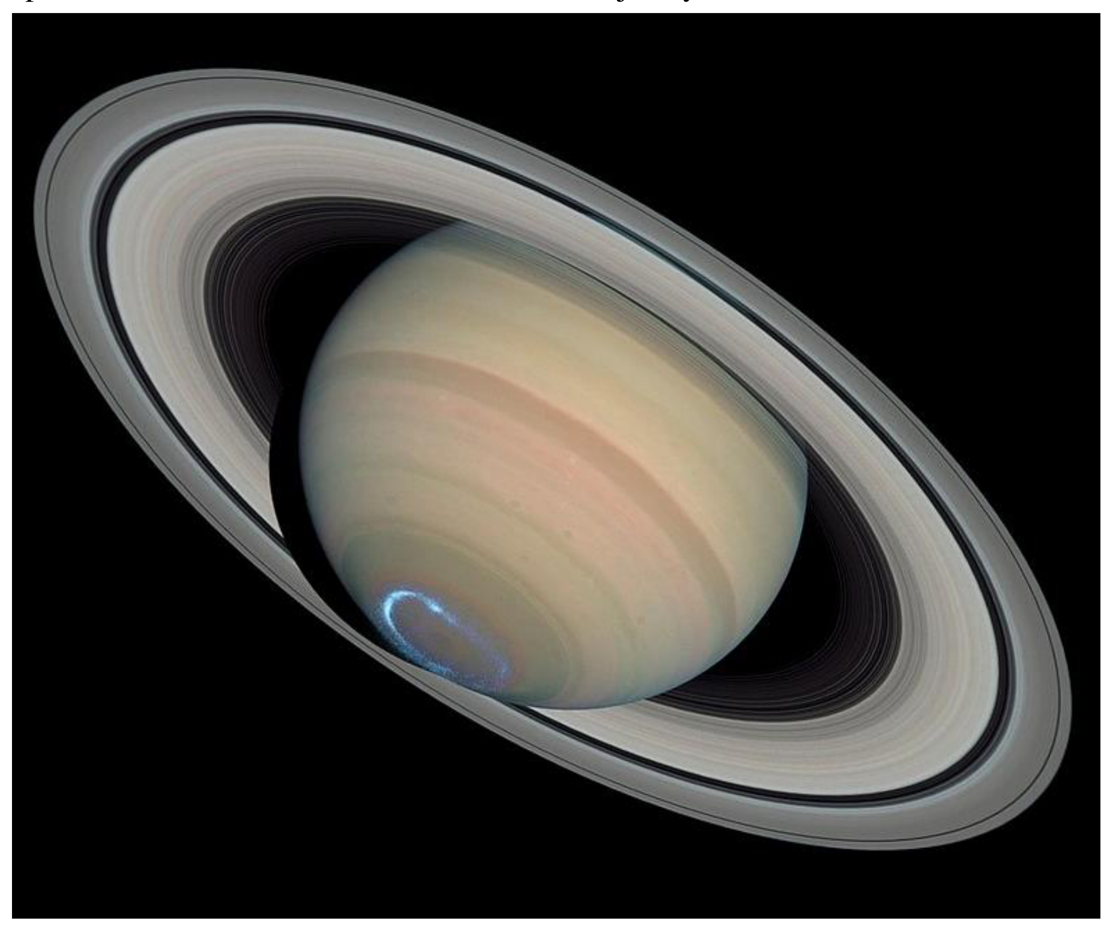


Auroras

Saturno tiene auroras polares brillantes que se han observado en luz UV, visible e IR cercana; las auroras generalmente se ven como círculos brillantes continuos (óvalos) que rodean los polos del planeta, la latitud de los óvalos aurorales varía en el rango de 70 a 80°; la posición promedio es de 75 ±1° para la aurora S, mientras que la aurora N está más cerca del polo en aproximadamente 1,5°; cualquiera de las auroras puede adoptar una forma de espiral en lugar de ovalada, en este caso, comienza cerca de la medianoche en una latitud de alrededor de 80°, luego su latitud disminuye a tan solo 70° a medida que continúa en los sectores de amanecer y día (en sentido antihorario), en el sector del anochecer, la latitud de las auroras aumenta nuevamente, aunque cuando regresa al sector nocturno todavía tiene una latitud relativamente baja y no se conecta con la parte más brillante del amanecer

A diferencia de Júpiter, los óvalos aurorales principales de Saturno no están relacionados con la ruptura de la co-rotación del plasma en las partes externas de la magnetosfera del planeta, se cree que las auroras en Saturno están conectadas a la reconexión del campo magnético bajo la influencia del viento solar, que impulsa una corriente ascendente (alrededor de 10 millones de amperios) desde la ionosfera y conduce a la aceleración y precipitación de electrones energéticos (1-10 keV) en la termosfera polar de Saturno, los propios óvalos corresponden a los límites entre las líneas de campo magnético abiertas y cerradas, los llamados casquetes polares, que se cree que residen a una distancia de 10 a 15° de los polos.

Las auroras son muy variables, su ubicación y brillo dependen en gran medida de la presión del viento solar, las auroras se vuelven más brillantes y se acercan a los polos cuando aumenta la presión del viento solar; de vez en cuando aparecen rasgos brillantes en el sector del amanecer del óvalo principal o en su interior; la potencia total media emitida por las auroras es de unos 50 GW en el UV lejano y de 150 a 300 GW en el IR cercano.



Saturno es una fuente de emisiones de radio de baja frecuencia bastante fuertes llamadas Radiación Kilométrica de Saturno (SKR), la frecuencia de SKR se encuentra en el rango de 10-1300 kHz (longitud de onda de unos pocos Km) con el máximo alrededor de 400 kHz.

El poder de estas emisiones está fuertemente modulado por la rotación del planeta y se correlaciona con los cambios en la presión del viento solar; cuando Saturno se sumergió en la cola magnética gigante de Júpiter durante el sobrevuelo de la sonda Voyager-2 en 1981, la potencia de SKR disminuyó considerablemente o incluso cesó por completo; se cree que la radiación kilométrica es generada por la inestabilidad de los electrones que se mueven a lo largo de las líneas del campo magnético relacionadas con las regiones aurorales de Saturno, el SKR está relacionado con las auroras alrededor de los polos del planeta; la radiación en sí comprende emisiones espectrales difusas, así como tonos de banda estrecha con anchos de banda tan estrechos como 200 Hz; en el plano de frecuencia-tiempo, a menudo se observan características de arco, al igual que en el caso de la radiación kilométrica joviana; la potencia total del SKR es de alrededor de 1 GW.

La modulación de las emisiones de radio por rotación planetaria se utiliza tradicionalmente para determinar el período de rotación del interior de planetas gigantes, en el caso de Saturno, sin embargo, esto parece imposible, ya que el período varía en una escala de tiempo de decenas de años; en 1980-1981, la periodicidad de las emisiones de radio medidas por las Voyager 1 y 2 fue de 10:39:24 hrs, que luego se adoptó como el período de rotación de Saturno; las sondas Galileo y Cassini-Huygens arrojaron un valor diferente 10:45:45 hrs.; otras observaciones adicionales indicaron que el período de modulación cambia hasta en un 1% en la escala de tiempo característica de 20 a 30 días con una tendencia adicional a largo plazo; existe una correlación entre el período y la velocidad del viento solar, sin embargo, las causas de este cambio siguen siendo un misterio.

Una razón puede ser que el campo magnético perfectamente simétrico axialmente de Saturno no logra imponer una rotación estricta sobre el plasma magnetosférico, haciéndolo deslizarse con respecto al planeta, la falta de una correlación precisa entre el período de variación de SKR y la rotación planetaria hace que sea casi imposible determinar el verdadero período de rotación de Saturno.

En la década de 1990, la nave Ulysses realizó amplias mediciones de la radiación SKR que no se puede observar desde la Tierra debido a la absorción en la ionosfera; el SKR es lo suficientemente poderoso como para ser detectado desde una nave espacial a la distancia de varias unidades astronómicas del planeta, la nave descubrió que el período del SKR varía hasta en un 1% y, por lo tanto, no está directamente relacionado con el período de rotación del interior de Saturno.

La región más interna de la magnetosfera cerca de los anillos generalmente carece de iones y electrones energéticos porque son absorbidos por las partículas del anillo, sin embargo, tiene el segundo cinturón de radiación descubierto por en 2004 por la sonda Cassini-Huygens, ubicado justo dentro del Anillo D; este cinturón es probable que consiste en partículas cargadas de energía o de átomos neutros energéticos ionizados provenientes del cinturón de radiación principal; los cinturones de radiación de Saturno son generalmente mucho más débiles que los de Júpiter y no emiten mucha radiación de microondas (con una frecuencia de unos pocos GHz). Sin embargo, las partículas de alta energía provocan la erosión de las superficies de las lunas heladas.

En 1979 la sonda Pioneer-11 descubrió el campo magnético e hizo algunas mediciones de los parámetros del plasma; en 1980 y 1981, las sondas Voyager 1 y 2 investigaron la magnetosfera utilizando un conjunto mejorado de instrumentos, midieron el campo magnético, composición y densidad del plasma, la distribución espacial y la energía de partículas de alta energía, ondas de plasma y emisiones de radio, la sonda Cassini continuó proporcionando información sobre el campo magnético y los parámetros del plasma de la magnetosfera de Saturno hasta su destrucción intencional el 15-09-2017.

Atmósfera de Titán (luna de Saturno)

La estructura atmosférica vertical de Titán es similar a la terrestre, tiene troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. Sin embargo, la gravedad superficial más baja de Titán crea una atmósfera más extendida, con alturas de escala de 15 a 50 Km en comparación con los 5 a 8 Km en la Tierra.

Troposfera

Es la capa donde ocurre gran parte del clima, dado que el metano se condensa en la atmósfera a gran altitud, su abundancia aumenta por debajo de la tropopausa a una altitud de 32 Km, estabilizándose en un valor del 4,9% entre 8 Km y la superficie, también en la troposfera se encuentran lluvias de metano, neblina y diversas capas de nubes.

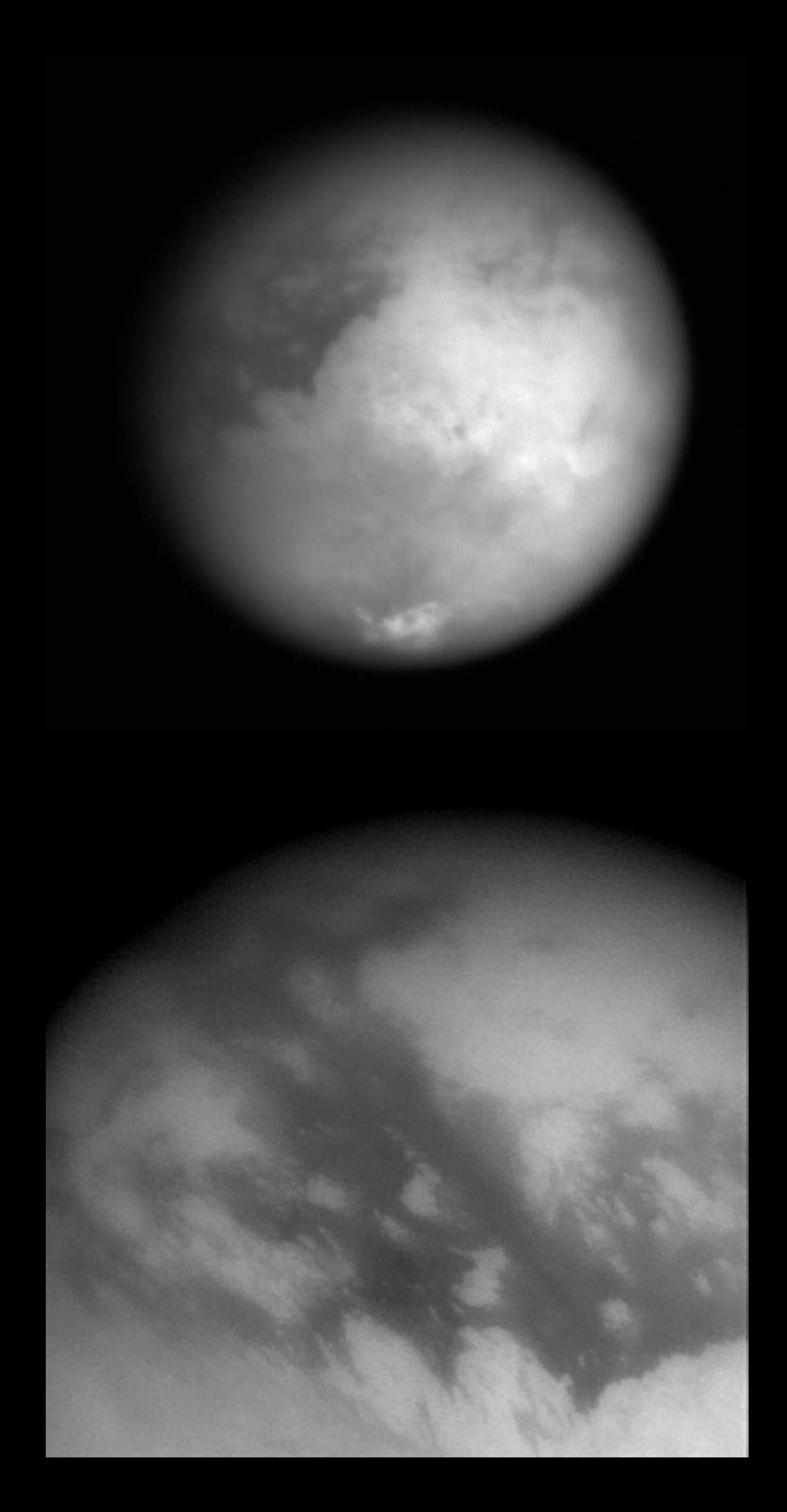
Similar al ciclo hidrológico en la Tierra, la luna Titán presenta un ciclo de metano, este ciclo da como resultado formaciones en su superficie que se asemejan a las formaciones que encontramos en la Tierra; en las regiones polares se encuentran lagos de metano y etano; el metano se condensa en nubes en la atmósfera y luego se precipita en la superficie que luego fluye hacia los lagos; parte del metano de los lagos se evaporará con el tiempo y volverá a formar nubes en la atmósfera, iniciando de nuevo el proceso. Sin embargo, dado que el metano se pierde en la termosfera, tiene que haber una fuente de metano para reponer el metano atmosférico; la energía del Sol debería haber convertido todos los rastros de metano de la atmósfera de Titán en hidrocarburos más complejos en 50 millones de años, esto sugiere que el metano debe ser reabastecido de alguna manera mediante un depósito en el propio Titán o dentro de él.



La mayor parte del metano de Titán se encuentra en la atmósfera, se transporta a través de la trampa fría en la tropopausa, por lo que la circulación de metano en la atmósfera influye en el equilibrio de radiación y la química de otras capas de la atmósfera.

La evidencia de que la atmósfera de Titán contiene mil veces más metano que monóxido de Carbono parecería descartar contribuciones significativas de los impactos de los cometas, porque los cometas están compuestos de mayor cantidad de monóxido de Carbono que metano, también parece improbable que Titán haya acumulado una atmósfera a partir de la nebulosa temprana de Saturno en el momento de su formación; en tal caso, debería tener abundancias atmosféricas similares a las de la nebulosa solar, incluidos Hidrógeno y Neón; astrónomos sugirieron que el origen del metano en la atmósfera es el propio Titán, liberado a través de erupciones criovolcánicas.

También se encuentra un patrón de circulación de aire que fluye en la dirección de la rotación, de O a E, además, se ha detectado variación estacional en la circulación atmosférica; observaciones atmosféricas realizadas por la sonda Cassini-Huygens en 2004 sugieren que Titán es un superrotador, con una atmósfera que gira mucho más rápido que su superficie.



Estratosfera

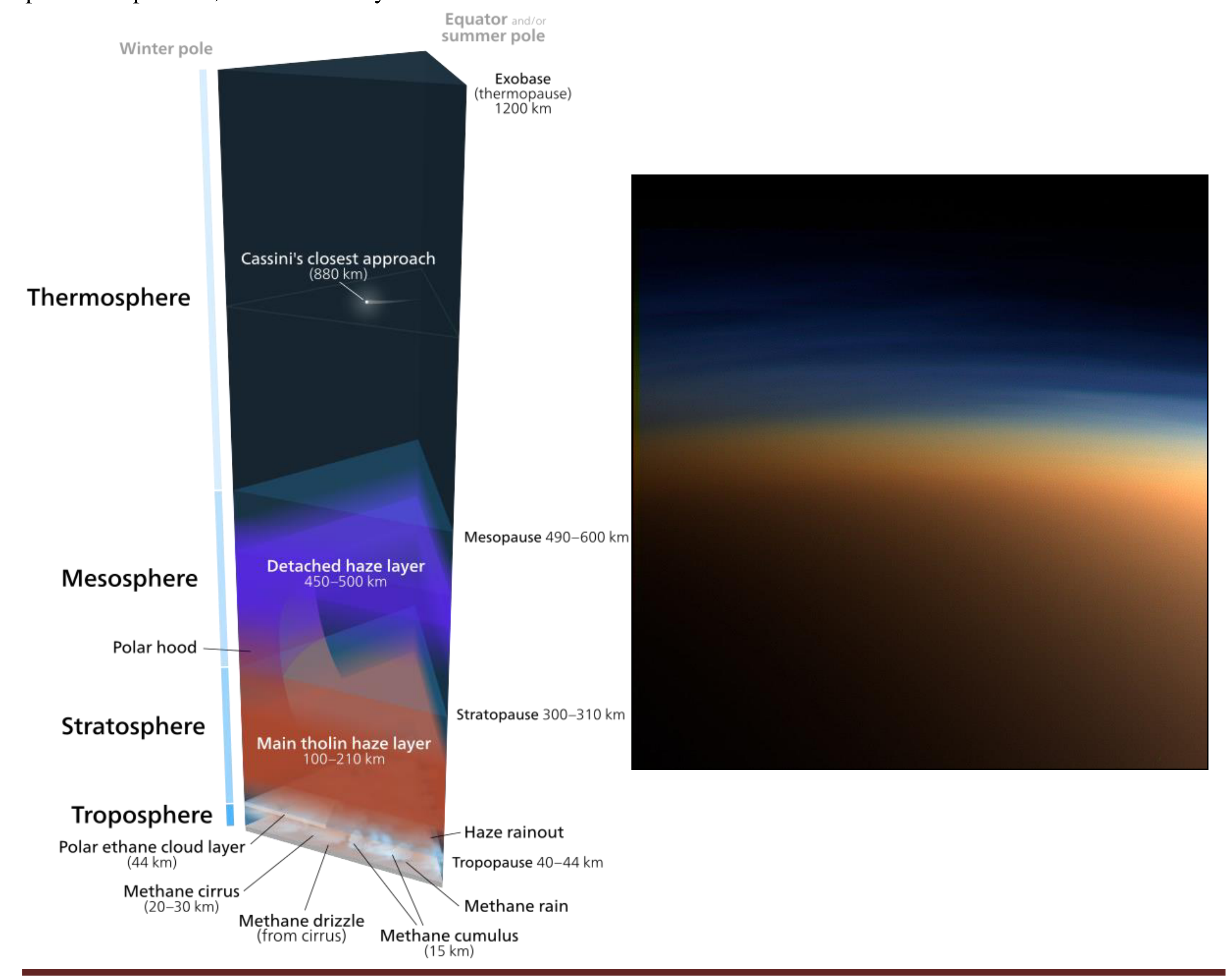
La composición atmosférica en la estratosfera es 98,4% de Nitrógeno y el 1,6% restante está compuesto por metano (1,4%) e Hidrógeno (0,1-0,2%), la capa principal de neblina de tolin se encuentra en la estratosfera a aprox. 100 a 210 Km; en esta capa atmosférica hay una fuerte inversión de temperatura causada por la neblina debido a una alta proporción de opacidad de onda corta a infrarroja.

Mesosfera

Se encuentra una capa de neblina desprendida a unos 450 a 500 Km, dentro de la mesosfera; la temperatura en esta capa es similar a la de la termosfera debido al enfriamiento de las líneas de cianuro de hidrógeno.

Termosfera

La producción de partículas comienza en la termosfera, esto se concluyó después de encontrar y medir iones y partículas pesadas, también el mayor acercamiento de la sonda Cassini a la atmósfera de Titán.

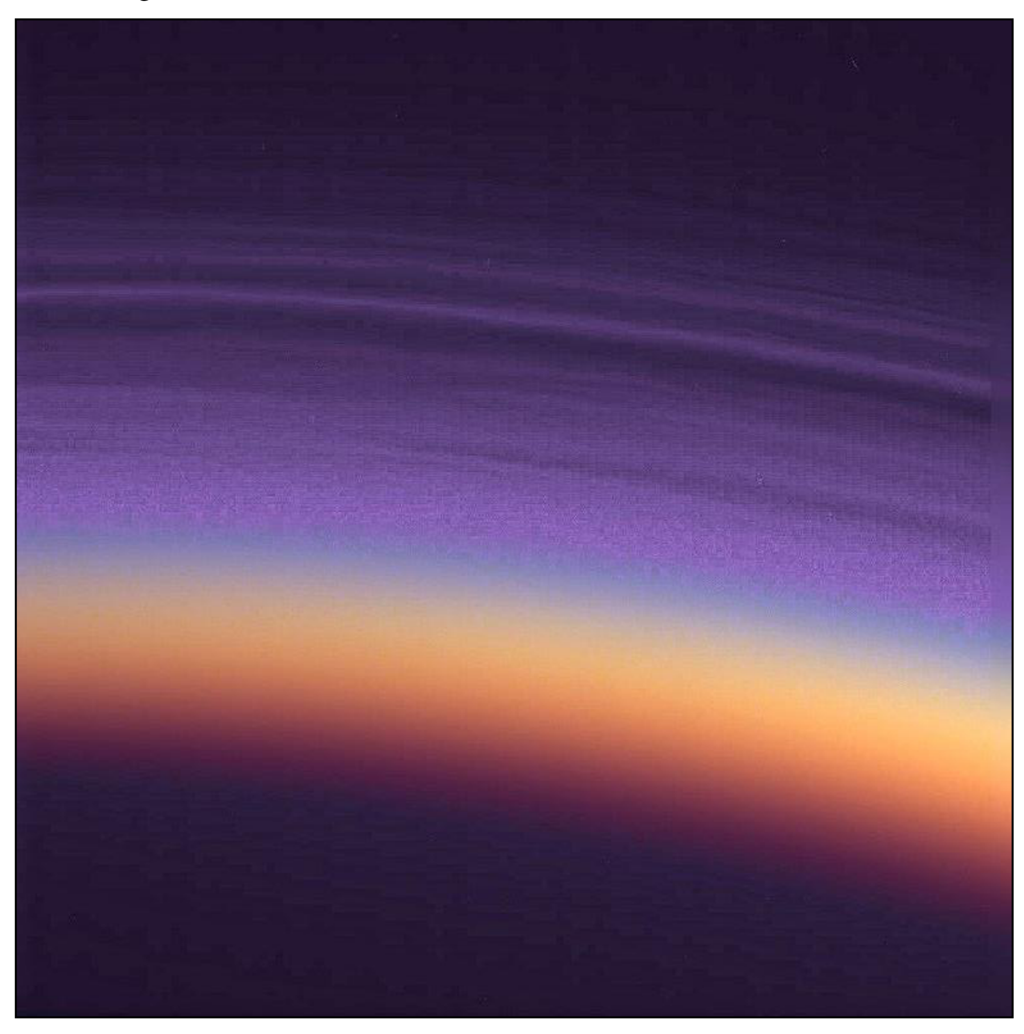


Ionosfera

La ionosfera de Titán también es más compleja que la de la Tierra, con la ionosfera principal a una altitud de 1200 Km pero con una capa adicional de partículas cargadas a 63 Km, esto divide hasta cierto punto la atmósfera de Titán en dos cámaras de radioresonancia separadas; la fuente de las ondas naturales de frecuencia extremadamente baja (ELF) en Titán detectadas por la sonda Cassini-Huygens, no está clara ya que no parece haber actividad de rayos, las principales fuentes de la ionosfera de Titán son la irradiancia solar, electrones e iones magnetosféricos de Saturno a la deriva a lo largo de las líneas del campo magnético y rayos cósmicos galácticos.

En 2007, los científicos descubrieron evidencia de iones negativos con aproximadamente 13800 veces la masa del Hidrógeno en la ionosfera de Titán, que se cree que caen en las regiones inferiores para formar la neblina naranja que oscurece la superficie; los iones negativos más pequeños fueron identificados como aniones de cadena de Carbono lineal con moléculas más grandes que muestran evidencia de estructuras más complejas, posiblemente derivadas del benceno.

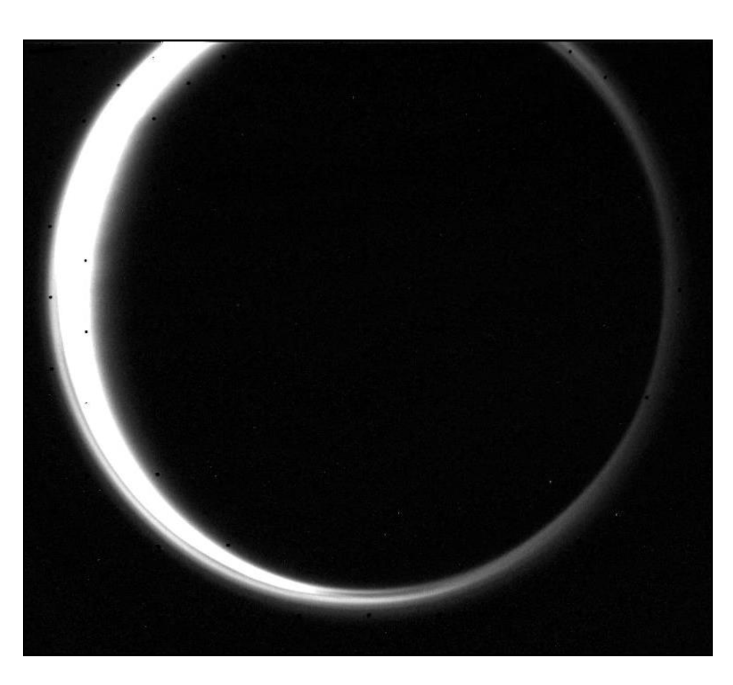
Estos iones negativos parecen desempeñar un papel clave en la formación de moléculas más complejas, que se cree que son tolinas, y pueden formar la base de los hidrocarburos aromáticos policíclicos, los cianopolinos y sus derivados; se ha demostrado que iones negativos como estos mejoran la producción de moléculas orgánicas más grandes en nubes moleculares más allá de nuestro Sistema Solar, una similitud que resalta la posible relevancia más amplia de los iones negativos de Titán.



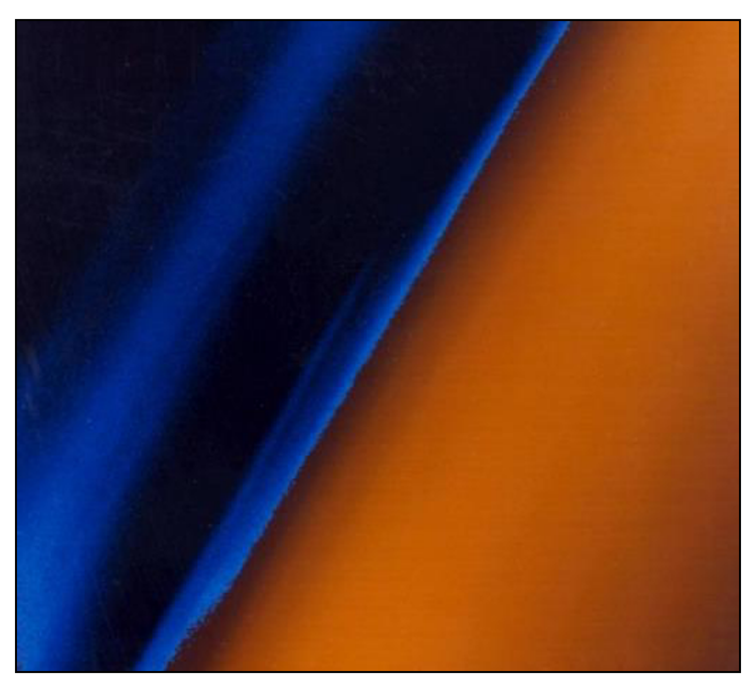
Sobrevuelos

El 11-11-1980, durante el máximo acercamiento de la Voyager a Titán (22000 Km), los instrumentos de la nave espacial descubrieron que la luna tiene una atmósfera sustancial, mucho más densa que la de Marte y posiblemente más densa que la de la Tierra; el 12-11-1980, la sonda Voyager 1 toma una fotografía del borde de Titán a una distancia de 435000 Km, mostrando a la luna completamente envuelta por una neblina que se fusiona con una capa de nubes más oscura sobre el polo N (tal manto no existe en el polo S).

El 25-08-1981, la sonda Voyager 2 sobrevoló Titán a una distancia de 900000 Km y tomó una fotografía con su cámara de ángulo estrecho; con un ángulo de fase de 155°, la espesa atmósfera se podía ver completamente iluminada alrededor del disco, y una capa de neblina superior se encontraba en gran parte de la circunferencia.

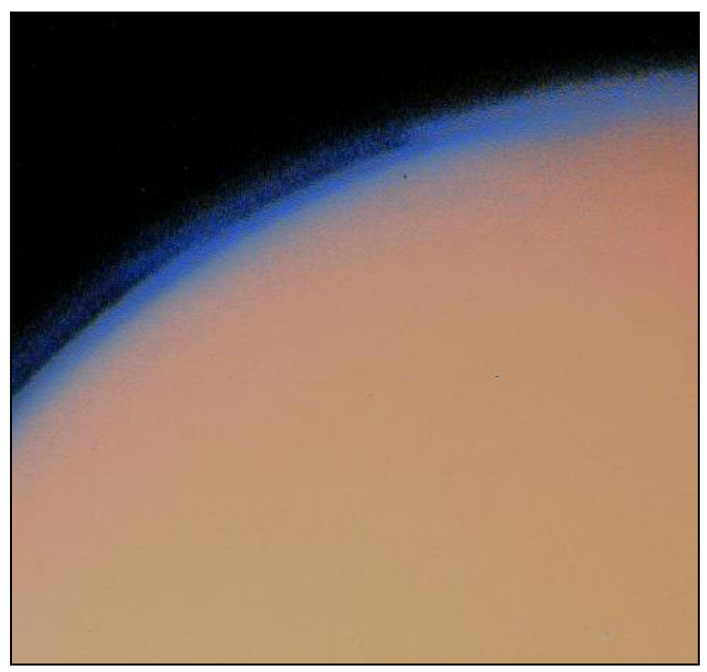


El 2-07-2004, la sonda Cassini-Huygens tuvo su primer sobrevuelo, un día después de la inserción en la órbita, cuando se acercó a 339000 Km de la superficie, las imágenes tomadas a través de filtros especiales (capaces de ver a través de la neblina global) mostraron nubes en el Polo S que se cree están compuestas de metano y características de la superficie con brillos muy diferentes; el 27-10-2004, la sonda Cassini ejecutó el primero de los 45 sobrevuelos cercanos planificados de Titán, cuando pasó a 1200 Km sobre la luna, transmitiendo a la Tierra las primeras imágenes de radar de la superficie envuelta en neblina, revelando que la superficie (el área cubierta por el radar) estaba relativamente nivelada, con una topografía que no alcanzaba más de 50 m de altitud, y los lagos de metano eran similares a los terrestres.

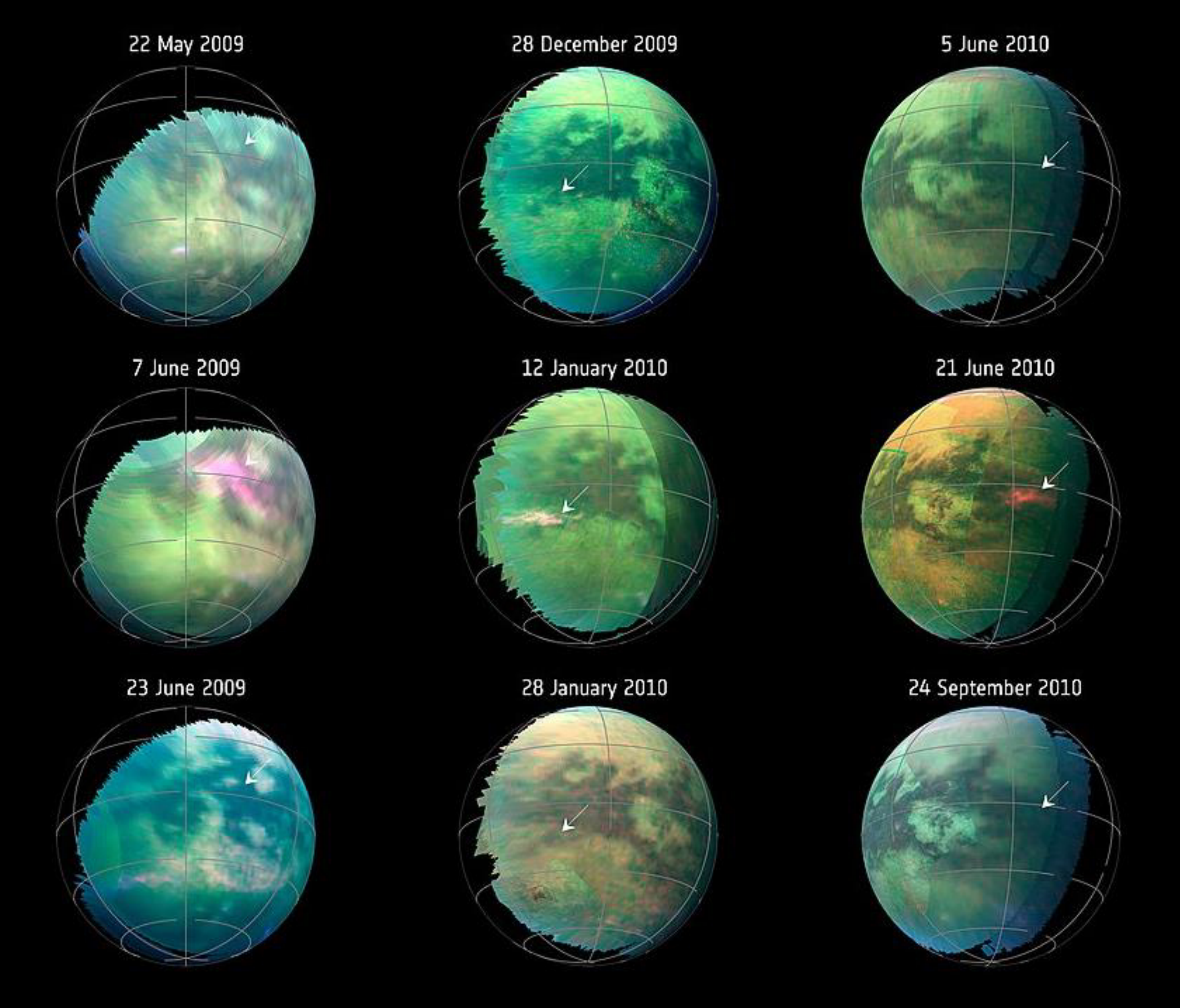




11-11-1980 - Voyager 1 - 22000 Km



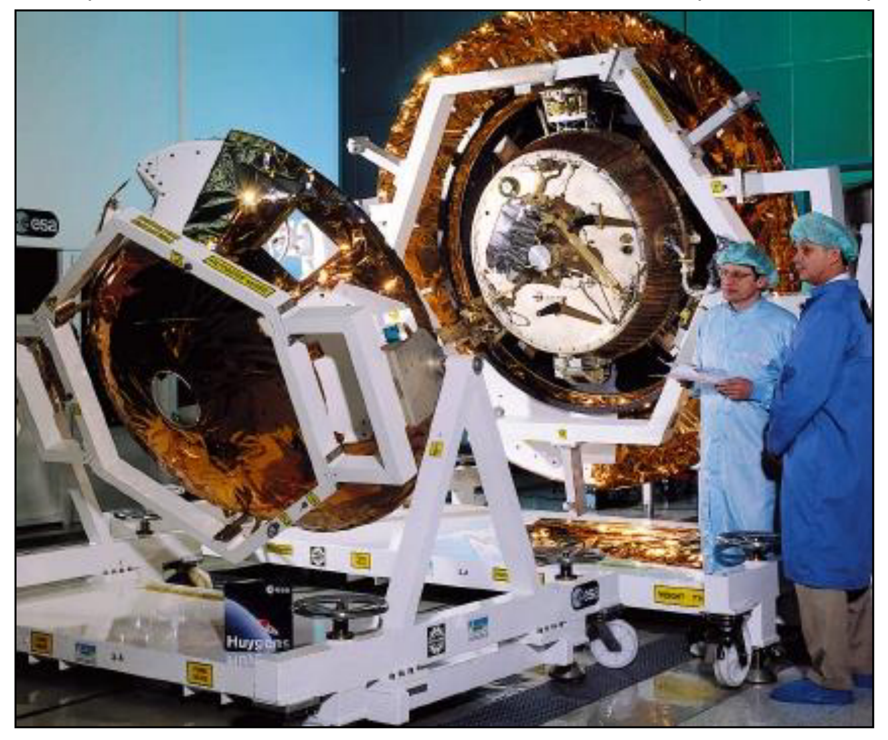
12-11-1980 - Voyager 1 - 435000 Km

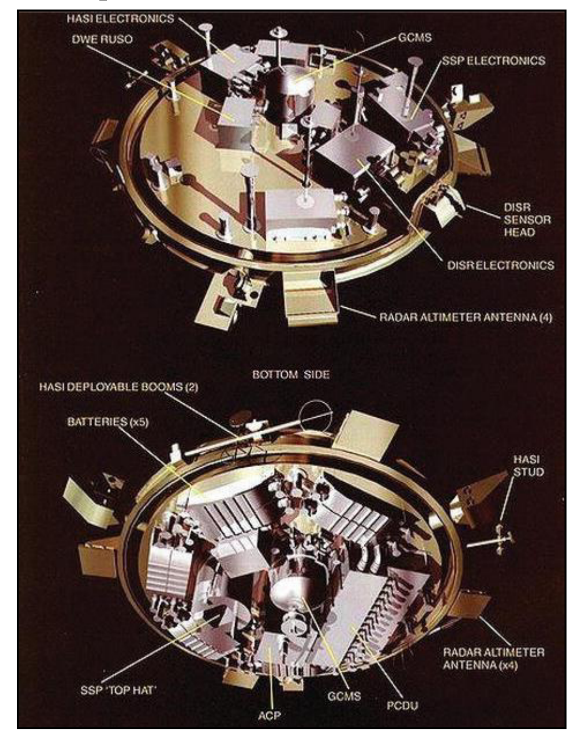

22 May 2009
28 December 2009
5 June 2010
7 June 2009
12 January 2010
21 June 2010
23 June 2009
28 January 2010
24 September 2010

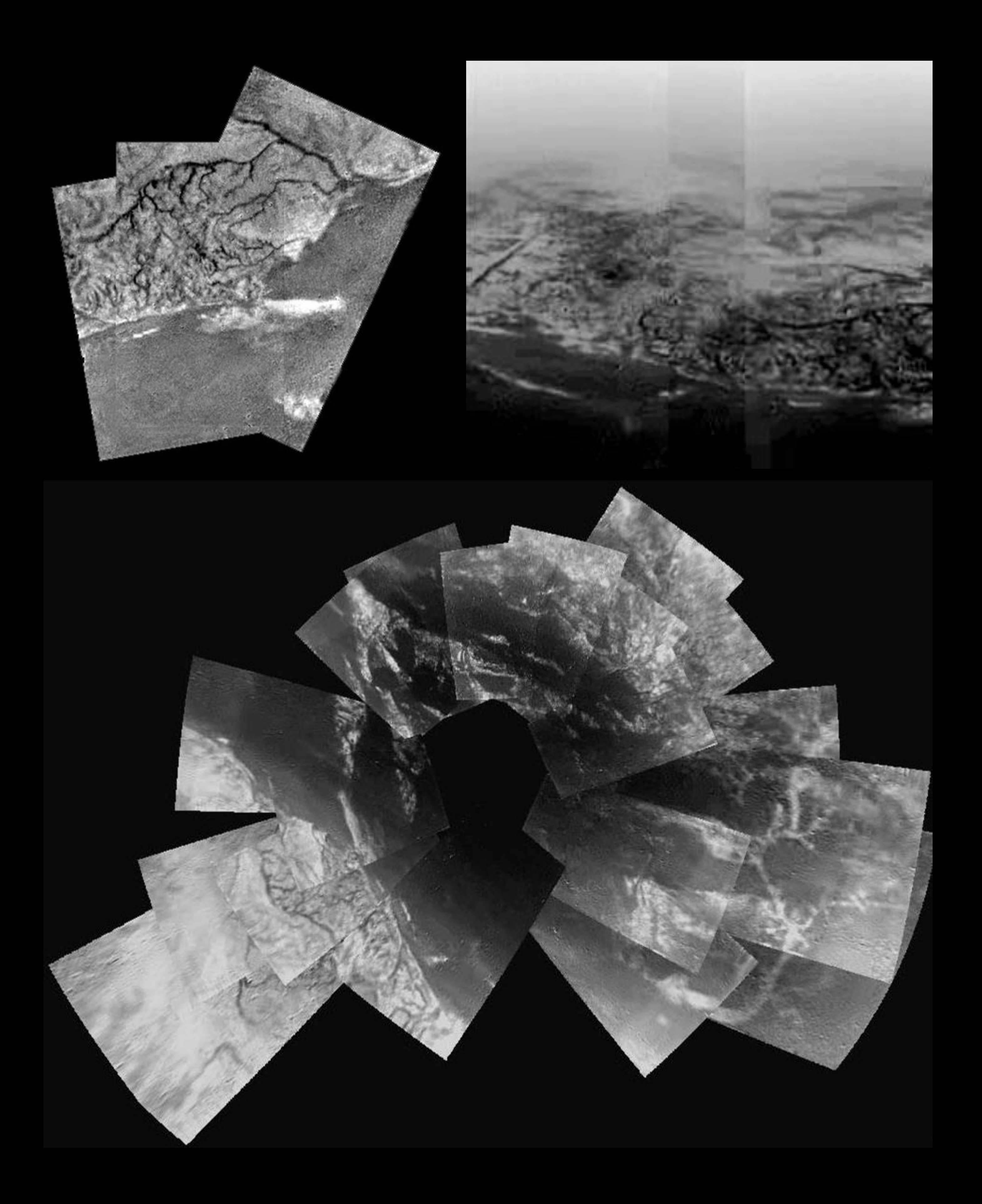
Sonda de Reentrada Atmosférica Huygens

El 25-12-2004 es lanzada desde la nave Cassini una pequeña sonda de reentrada atmosférica (Huygens) con los objetivos de determinar e investigar las fuentes de energía para la química atmosférica, estudiar las propiedades de los aerosoles y la física de las nubes, determinar las condiciones físicas en la región donde la sonda Voyager había observado la formación de neblinas, identificar los componentes que se condensan en esa parte de la atmósfera y cualquier dato que pudiera sugerir la existencia de nubes en la parte superior de la troposfera, medir los vientos y temperaturas globales, determinar las propiedades de la superficie y la estructura interna, investigar la atmósfera e ionosfera, realizar un estudio detallado in situ de la atmósfera de Titán y caracterizar la superficie del satélite a lo largo de la trayectoria de descenso y cerca del lugar de aterrizaje; tras la fase de entrada, al inicio de la fase de descenso y tras el despliegue del paracaídas (185 Km de altitud) todos los instrumentos tenían acceso directo a la atmósfera, los objetivos eran realizar mediciones detalladas en el lugar de la estructura, composición y dinámica de la atmósfera, imágenes y otras mediciones de la superficie por teledetección que se realizarían durante el descenso atmosférico; la carga útil incluyó la capacidad de realizar mediciones in situ para una caracterización de la superficie del lugar de aterrizaje, las baterías podían proporcionar de 30 a 45 min de energía eléctrica para una fase científica de superficie extendida que sería la ventaja de la misión, se previó que la nave Cassini recibiera datos de la sonda durante 3 hrs, lo que incluía al menos una fase de superficie de 30 min.

La sonda entró en la atmósfera de Titán el 14-01-2005, durante el descenso que tuvo una duración de 2:30 hrs, los instrumentos revelaron una nube densa o niebla gruesa a 18-20 Km de la superficie; también captó sonidos de rayos, por sus fotografías se pudo apreciar que el metano erosiona el paisaje como en la Tierra y luego se filtra, la superficie sólida de Titán es naranja, esponjosa, fría y con rocas dispersas sobre ella, la superficie misma parece consistir en un material arcilloso junto a rocas de hielo; pudo haber algo parecido a actividad volcánica en el pasado, solo que en lugar de lava las erupciones habrían sido de hielo y amoníaco, finalmente Huygens aterriza en la superficie tomando una única fotografía; la nave Cassini transmite con éxito 350 imágenes que recibió de la sonda Huygens durante su descenso y aterrizaje; un error de software no logró encender uno de los receptores de la nave, provocando la pérdida de imágenes; las fotos enviadas mostraban un paisaje de características similares a la Tierra y tormentas de viento con velocidades entre 60 y 100 Km/h, y una temperatura de -180 °C.



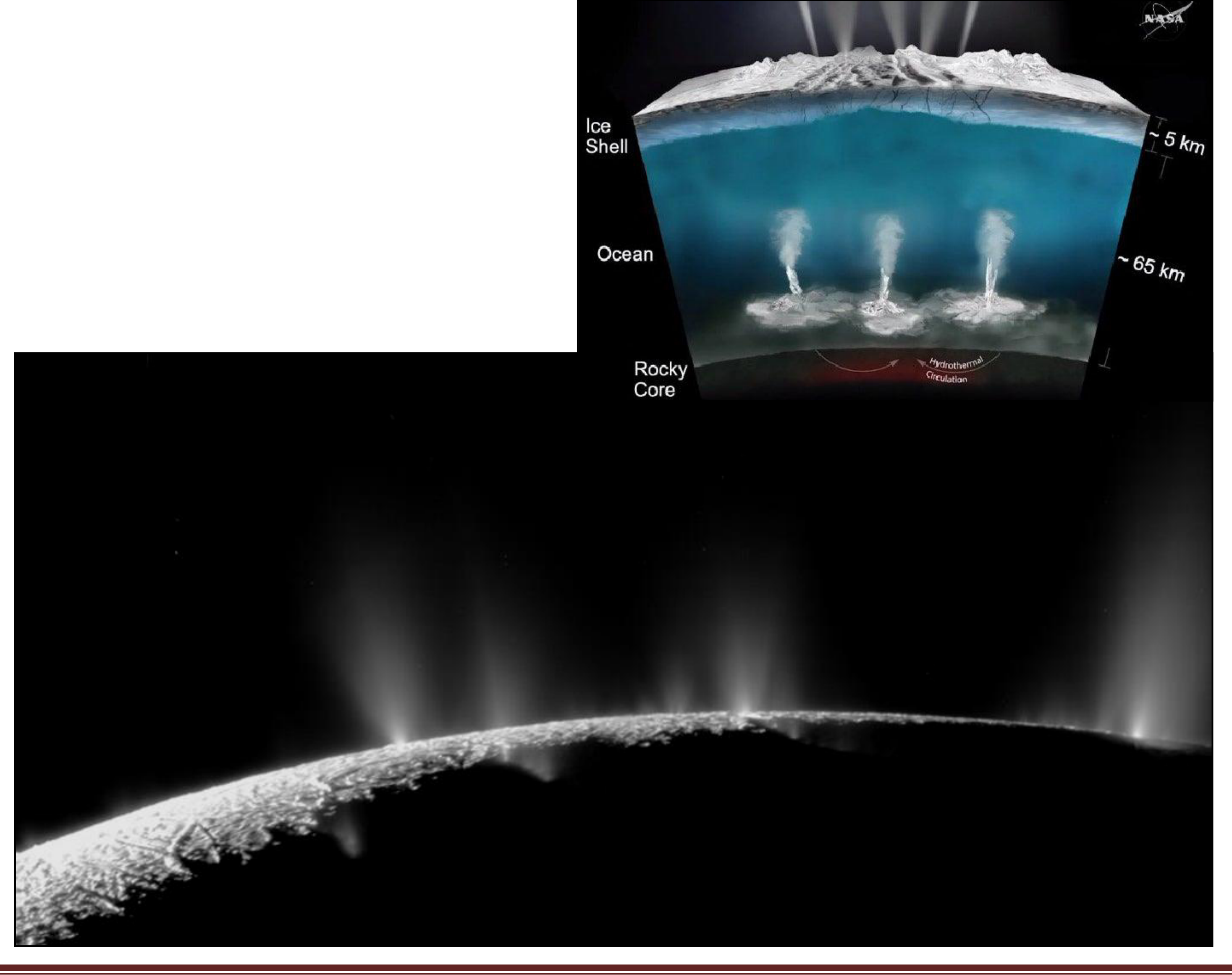


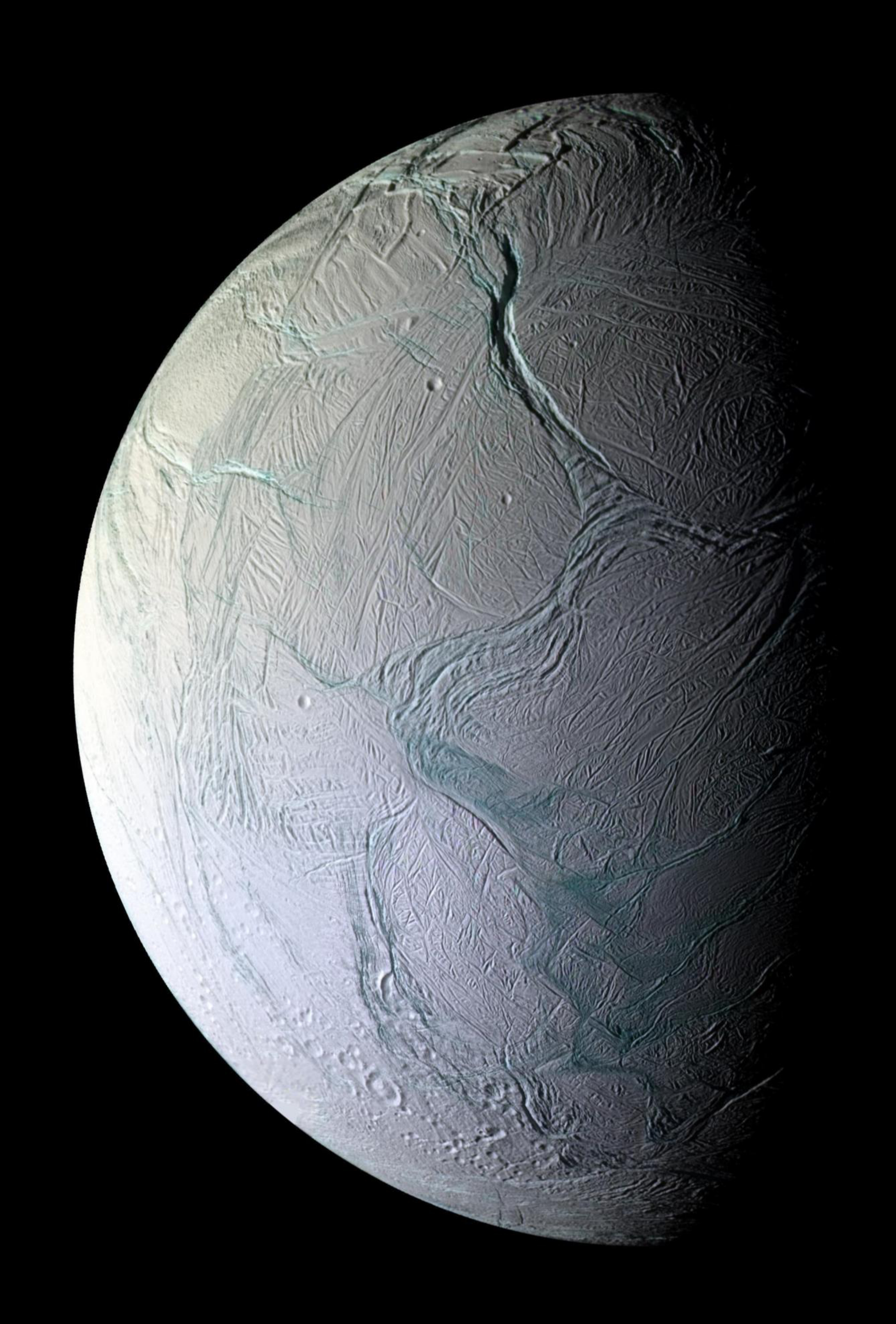


Atmósfera de Enceladus (luna de Saturno)

En el año 2005, la sonda Cassini-Huygens en su sobrevuelo a Enceladus descubrió una desviación en el campo magnético local que es característica de la existencia de una atmósfera delgada pero significativa, otras mediciones obtenidas en ese momento apuntaron al vapor de H_2O ionizada como su componente principal, también observó géiseres de hielo de H_2O en erupción desde el Polo S de la luna, lo que da más credibilidad a la idea de que la luna está suministrando partículas al anillo E de Saturno, como también agrega plasma a la magnetosfera de Saturno, una fracción de este gas es ionizado por los electrones calientes y la radiación UV solar y se agrega al flujo de plasma co-rotacional, nuevos datos obtenidos por la sonda Cassini en 2004-2008 establecieron que, después de todo, no es una fuente significativa de Nitrógeno, aunque aún puede proporcionar cantidades significativas de hidrógeno (debido a la disociación del metano)

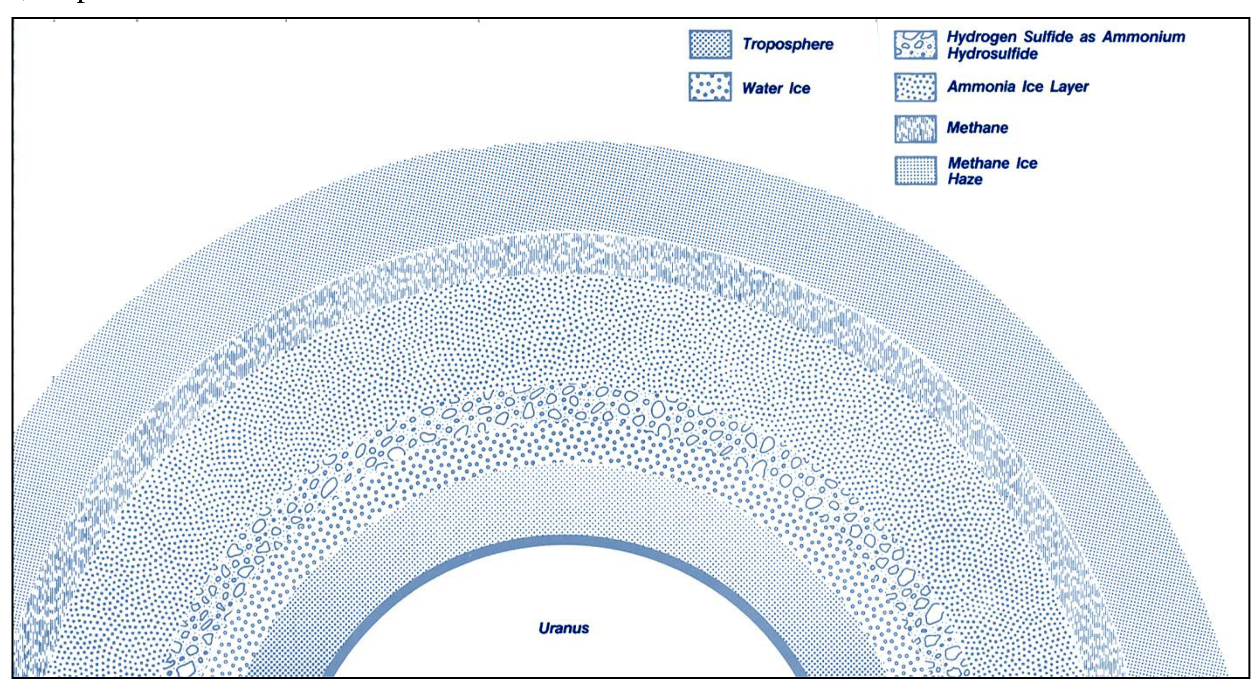
El 12-03-2008, la sonda Cassini-Huygens sobrevoló a 50 Km de la superficie y pasó a través de las columnas que se extienden desde sus géiseres del S, detectando con su espectrómetro de masas, dióxido de Carbono, H_2O e hidrocarburos; mapeó las características de la superficie con el espectrómetro IR, descubriendo que están a una temperatura mucho más alta que su entorno, no pudo recopilar datos con el analizador de polvo cósmico debido a un mal funcionamiento del software.





Atmósfera de Urano

La atmósfera gaseosa hace una transición gradual hacia las capas líquidas internas, sin embargo, se describe como un esferoide oblato de revolución, donde la presión es de 1 bar y se designa como superficie, posee un radio ecuatorial de 25559 ±4 Km y polar de 24973 ±20 Km, respectivamente (considerándose esta superficie como punto 0 de altitud) aunque no existe una superficie sólida bien definida en su interior, la parte más exterior de la envoltura gaseosa (que es accesible por sensores remotos) se denomina atmósfera, la capacidad de los sensores remotos llega a aproximadamente hasta unos 300 Km por debajo del nivel de 1 bar, con una presión de alrededor de 100 bares y una temperatura de 46 °C, la corona tenue de la atmósfera se extiende notablemente por encima de dos radios planetarios desde la superficie nominal (punto con presión de 1 bar) la atmósfera de se puede dividir en tres capas, troposfera, entre altitudes de -300/50 Km y presiones desde 100 a 0,1 bar, estratosfera, en altitudes entre 50/4000 Km y presiones entre 0,1/10 bares, termosfera/corona, que se extiende desde 4000/50000 Km de la superficie, no posee mesosfera.



Composición atmosférica

La composición de la atmósfera consiste principalmente de Hidrógeno molecular y Helio, el número de átomos de Helio por molécula de gas, es de 0,15 ±0,03 en la troposfera superior, que corresponde a una fracción de masa de 12,26 ±0,05; valor muy próximo a la fracción de masa de Helio protosolar de 0,275 ±0,01, indicando que el Helio no se depositó en el centro del planeta contrariamente al resto de los gigantes gaseosos, el tercer componente más abundante en la atmósfera es el metano, teniendo bandas de absorción prominentes en la banda de luz visible y casi IR que dan el color aguamarina o cian; las moléculas de metano representan el 2,3% de la atmósfera por fracción molar bajo la cubierta de nubes de metano en el nivel de presión de 1,3 bar, la tasa de mezcla es mucho menor en la atmósfera superior debido a su temperatura extremadamente baja, disminuyendo el nivel de saturación y provocando que el metano excedente se congele y salga; la abundancia de compuestos menos volátiles como el amoníaco, H_2O o ácido sulfhídrico en la atmósfera interior es poco conocida, además de metano, también se encuentran cantidades residuales de varios hidrocarburos en la estratosfera, posiblemente producidos a partir del metano mediante fotólisis inducida por la radiación UV del Sol, esto incluye al etano, acetileno, poliacetileno, metilacetileno, la espectroscopia también descubrió trazas de vapor de H_2O; monóxido de Carbono y dióxido de Carbono en la atmósfera superior, que sólo se pueden haber originado desde una fuente externa como el polvo de los cometas.



Troposfera

Es la parte más baja y densa de la atmósfera y se caracteriza por una disminución de la temperatura con la altitud, la temperatura cae desde 46 °C en la base de la troposfera nominal (-300 Km) hasta -223 °C a 50 Km, las temperaturas en la región superior más fría de la troposfera (tropopausa) varían entre los -224/-216 °C, según la latitud planetaria, la región de la tropopausa es responsable de la gran mayoría de las emisiones térmicas en IR lejano del planeta, determinando así su temperatura efectiva de 215 °C, se cree que la troposfera tiene una estructura de nubes altamente compleja; se estima que se pueden encontrar nubes de H_2O en el rango de presiones de 50/100 bares, nubes de hidrosulfuro de amonio en el rango de 20/40 bares, nubes de amoníaco o sulfuro de Hidrógeno entre 3/10 bares y finalmente nubes altas de metano que se han detectado directamente en el rango de 1/2 bar, la troposfera es una parte muy dinámica de la atmósfera, con vientos fuertes, nubes brillantes, y cambios estacionales.

Atmósfera superior

La capa media de la atmósfera es la estratosfera, donde la temperatura aumenta en general con la altitud desde -220 °C en la tropopausa hasta entre 526/576 °C en la base de la termosfera, el calentamiento de la estratosfera se debe a la absorción de radiación solar UV e IR por el metano y otros hidrocarburos, que se forman en esta parte de la atmósfera como resultado de la fotólisis del metano, el calor también llega por conducción desde la Termosfera, los hidrocarburos ocupan una capa relativamente estrecha en altitudes entre 100 y 280 Km, que corresponden con un rango de presiones de 10 a 0,1 bar y temperaturas entre -198/-103 °C, los hidrocarburos más abundantes son el metano, el acetileno y el etano con tasas de mezcla alrededor de 10-7 en relación con el Hidrógeno, la tasa de mezcla del monóxido de Carbono es similar en estas altitudes, los hidrocarburos más pesados y el dióxido de Carbono tienen tasas de mezcla inferiores en tres órdenes de magnitud, la tasa de abundancia de H_2O es alrededor de $7x10^{-9}$, el etano y el acetileno tienden a condensarse en la parte inferior, más fría, de la estratosfera y la tropopausa (por debajo del nivel de 10 mb) formando capas de niebla o bruma, que pueden ser responsables en parte del aspecto liso del planeta, la concentración de hidrocarburos en la estratosfera por encima de la niebla es significativamente más baja que en las estratosferas de los otros planetas gigantes.

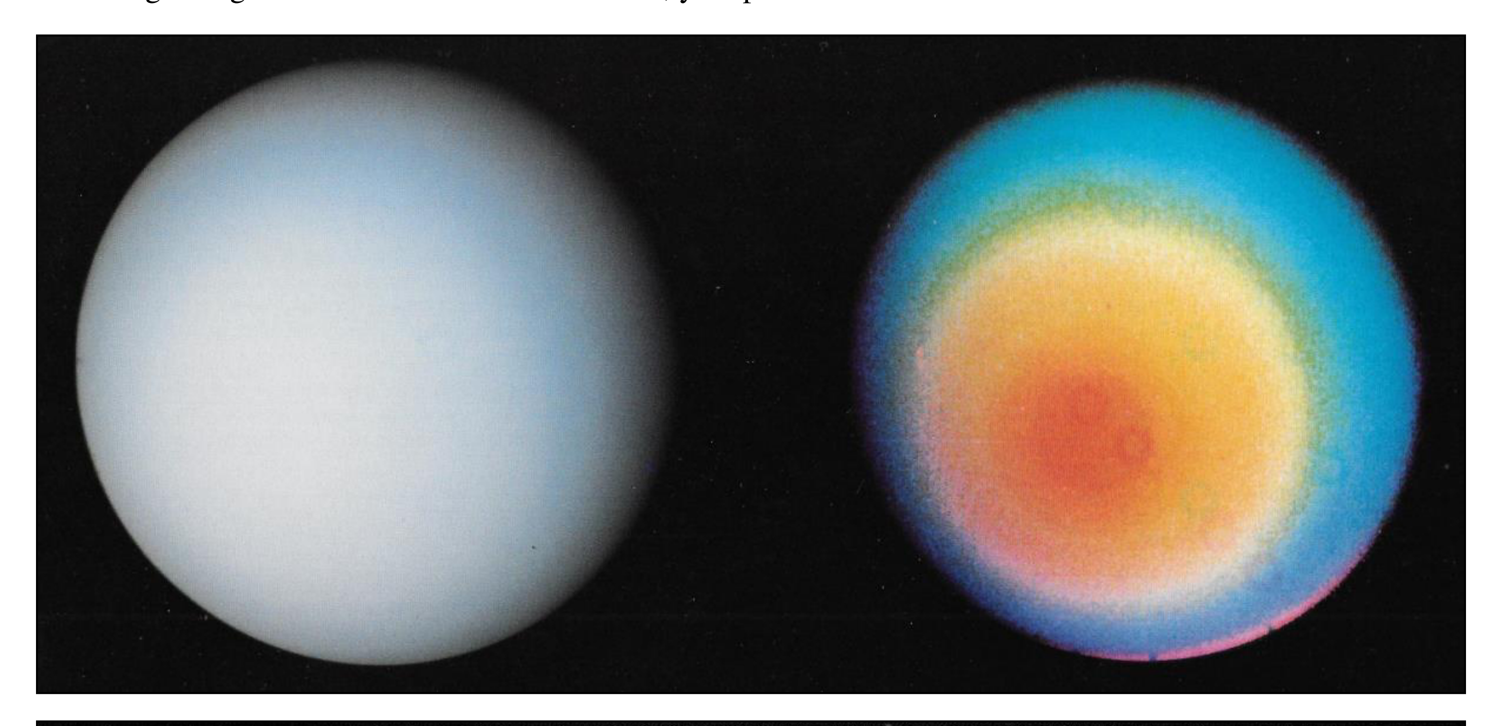
Termosfera-Corona

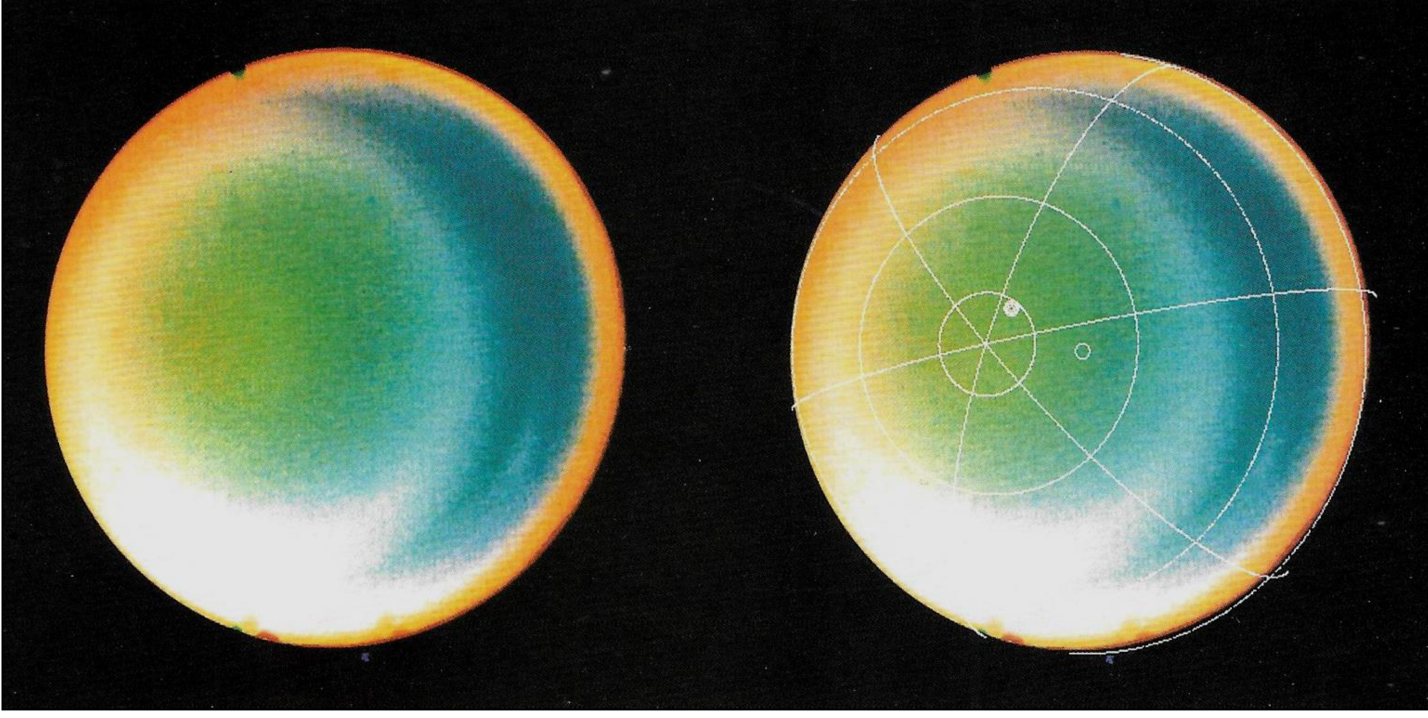
La capa más exterior de la atmósfera es la termosfera-corona, que tiene una temperatura uniforme alrededor de 526/576 °C, las fuentes de calor necesarias para sostener un valor tan elevado todavía no se entienden, ya que ni la radiación solar UV lejana o UV extrema ni la actividad de las auroras pueden proporcionar la energía necesaria, también puede contribuir la débil eficiencia de refrigerado debida a la falta de hidrocarburos en la estratosfera por encima del nivel de presión de 0,1 mbar, además de Hidrógeno molecular, la termosfera-corona contiene una proporción elevada de átomos de Hidrógeno libres, su pequeña masa junto con las altas temperaturas explican por qué la corona se extiende hasta 50000 Km desde el planeta, el que sea tan extensa es una propiedad única de Urano, uno de sus efectos es la resistencia aerodinámica sobre partículas pequeñas en órbita provocando que en general se agote el polvo interestelar a los anillos del planeta.

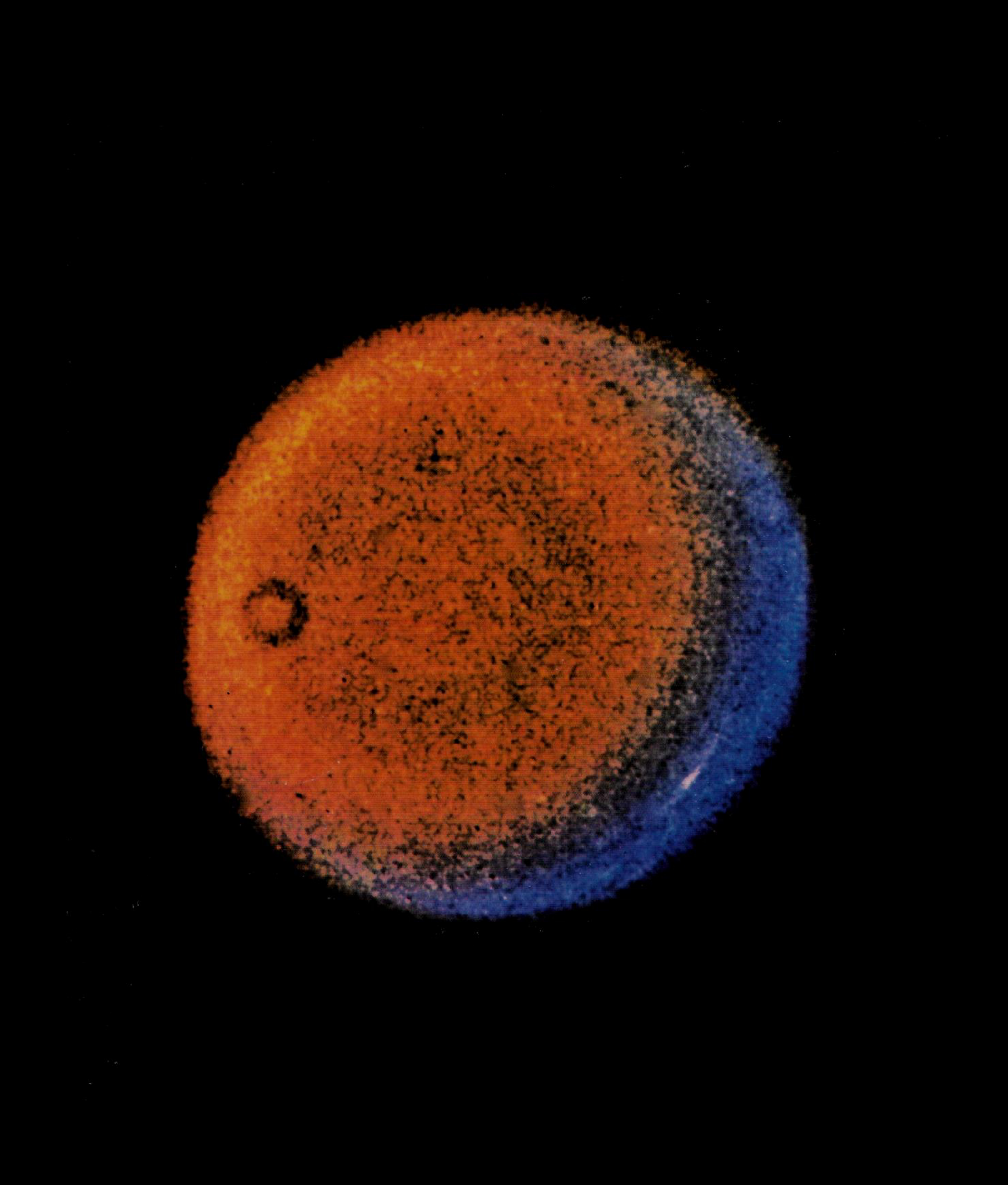
Observaciones muestran que la ionosfera ocupa altitudes desde 2000 a 10000 Km (es más densa que la de Saturno o Neptuno) lo que puede deberse a la baja concentración de hidrocarburos en la estratosfera, la ionosfera se sostiene principalmente por la radiación UV solar y su densidad depende de la actividad solar.

Estructura en bandas, vientos y nubes

En 1986 la sonda Voyager-2 descubrió que el hemisferio S visible de Urano se puede subdividir en dos regiones, un Casquete Polar brillante y bandas ecuatoriales oscuras, su límite se encuentra a unos -45° de latitud, una banda estrecha se extiende entre -45/-50° de latitud y es la característica grande más brillante de la superficie visible del planeta, denominado Collar Meridional, se cree que el Casquete Polar y el Collar Meridional son regiones densas de nubes de metano situadas dentro del rango de presiones entre 1,3 y 2 bares, además de la estructura de bandas de gran escala; la sonda Voyager-2 observó pequeñas nubes brillantes, la mayoría de las cuales se encontraban situadas algunos grados al N del Collar Meridional, y no pudo observar el hemisferio N.

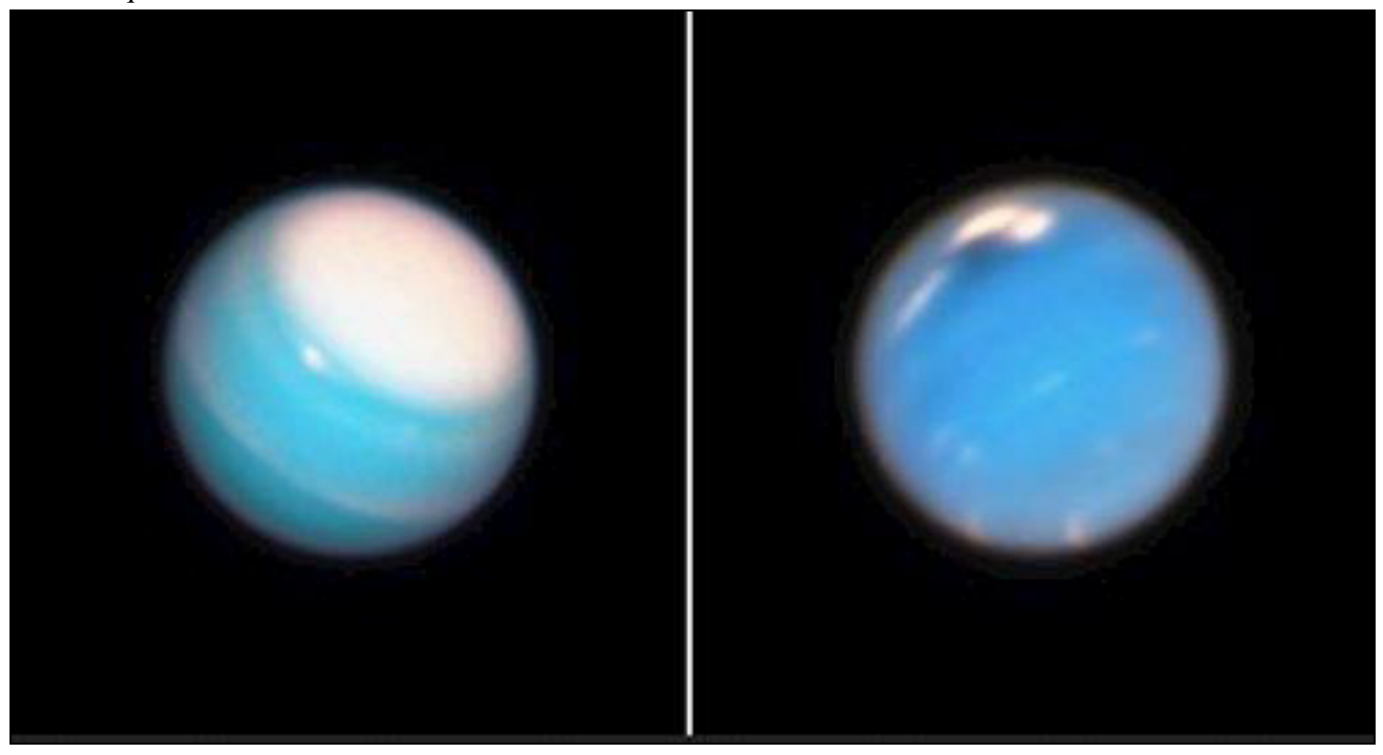






En la década de 1990, el número de formas de nubes brillantes observadas creció considerablemente, en parte gracias a la disponibilidad de nuevas técnicas de procesamiento de imágenes en alta resolución, la mayoría se encontraron en el hemisferio N a medida que se iba haciendo visible (las nubes brillantes son más fáciles de identificar en la parte oscura del planeta, existen diferencias entre las nubes de cada hemisferio, las nubes septentrionales son más pequeñas, más definidas y más brillantes, asimismo, parece que están situadas en una altitud más elevada, el tiempo de vida de las nubes puede diferir en varios órdenes de magnitud, algunas nubes pequeñas duran horas, mientras que una nube meridional parece que ha persistido desde la época del vuelo del Voyager 2, observaciones recientes también han descubierto que las formas de las nubes de Urano tienen muchas cosas en común con las de Neptuno.

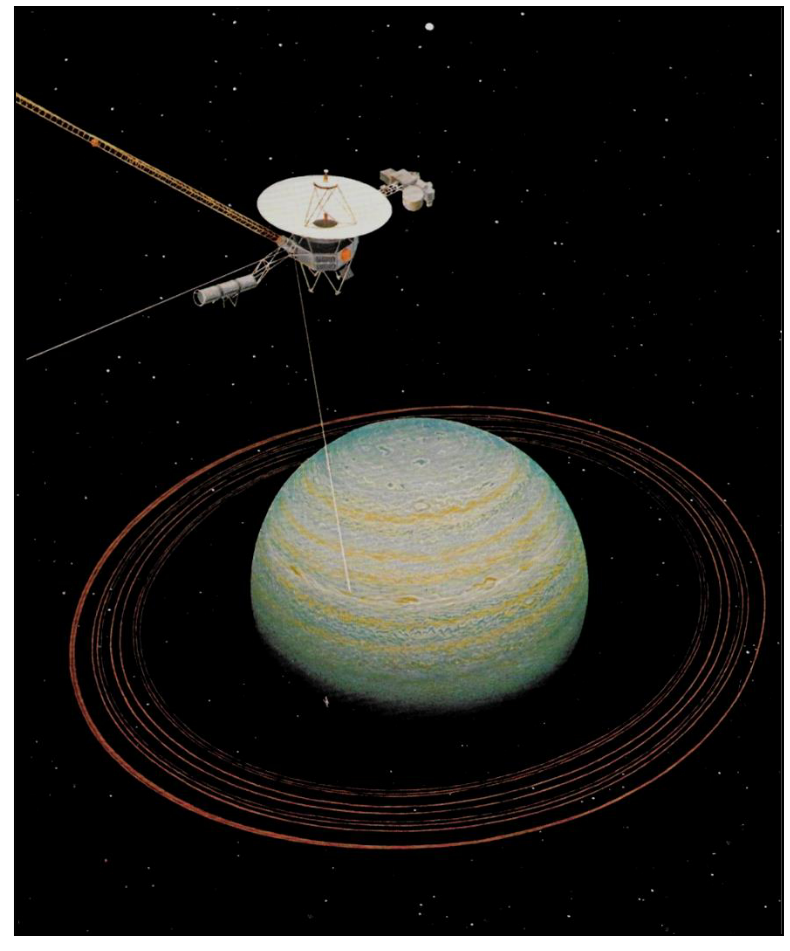
A principios de la década del 2000, cuando la región polar septentrional se hizo visible, el Telescopio Espacial Hubble (foto) y el Telescopio Keck no observaron ni el Collar Meridional ni el Casquete Polar N, por lo tanto, Urano parece asimétrico, brillante cerca del polo S y oscuro uniformemente en la región situada al N del Collar Meridional; en 2007, cuando Urano pasó a su equinoccio, el Collar S casi había desaparecido, mientras que en el N surgía un Collar débil a unos 45° de latitud, las manchas oscuras frecuentes en el planeta Neptuno no se habían observado nunca en Urano antes de 2006, se especula que Urano se va pareciendo cada vez más a Neptuno durante la estación equinoccial.



El seguimiento de numerosas formas de nubes permitió la determinación de vientos zonales y meridionales soplando en la troposfera superior, en el ecuador los vientos son retrógrados (soplan en la dirección contraria de la rotación del planeta) sus velocidades varían entre -360/-180 Km/h, las velocidades de los vientos aumentan con la distancia al ecuador, alcanzando niveles cero en torno a la latitud ±20°, donde se sitúa la temperatura mínima de la troposfera, más cerca de los polos, los vientos cambian a un movimiento progrado, siguiendo la rotación del planeta; las velocidades del viento continúan aumentando llegando al máximo a una latitud de ±60° antes de volver a cero en los polos, las velocidades del viento a una latitud de -40° varían entre 540/720 Km/h, como el Collar oscurece todas las nubes debajo de este paralelo, las velocidades entre este y el polo S son imposibles de medir, en contraste, en el hemisferio N se han observado velocidades máximas de hasta 864 Km/h alrededor de la latitud +50°.

Durante un periodo corto de tiempo en el año 2004, aparecieron nubes grandes en la atmósfera, dándole un aspecto parecido a Neptuno, se observaron velocidades de viento récord de 824 Km/h y una tormenta persistente, en 2006 se observó una mancha oscura en la superficie, dando a los astrónomos más datos sobre la actividad atmosférica del planeta, no se conoce exactamente el porqué se produce este aumento repentino de actividad, pero al parecer la inclinación extrema del eje tiene como resultado variaciones estacionales extremas en el tiempo atmosférico, determinar la naturaleza de esta variación estacional es difícil porque hace menos de 84 años (que equivalen a un año en Urano) que hay datos fiables sobre su atmósfera, sin embargo, se han hecho algunos descubrimientos.

La fotometría a lo largo de medio año de Urano (desde la década de 1950) ha mostrado una variación regular del brillo en dos bandas espectrales, con los máximos durante los solsticios y los mínimos durante los equinoccios, se ha observado una variación periódica similar, con máximos durante los solsticios, a las medidas para microondas de la parte más profunda de la troposfera que empezaron en los años 1960, las medidas de la temperatura de la estratosfera, que empezaron en los años 1970, también mostraron valores máximos en torno al solsticio de 1986.

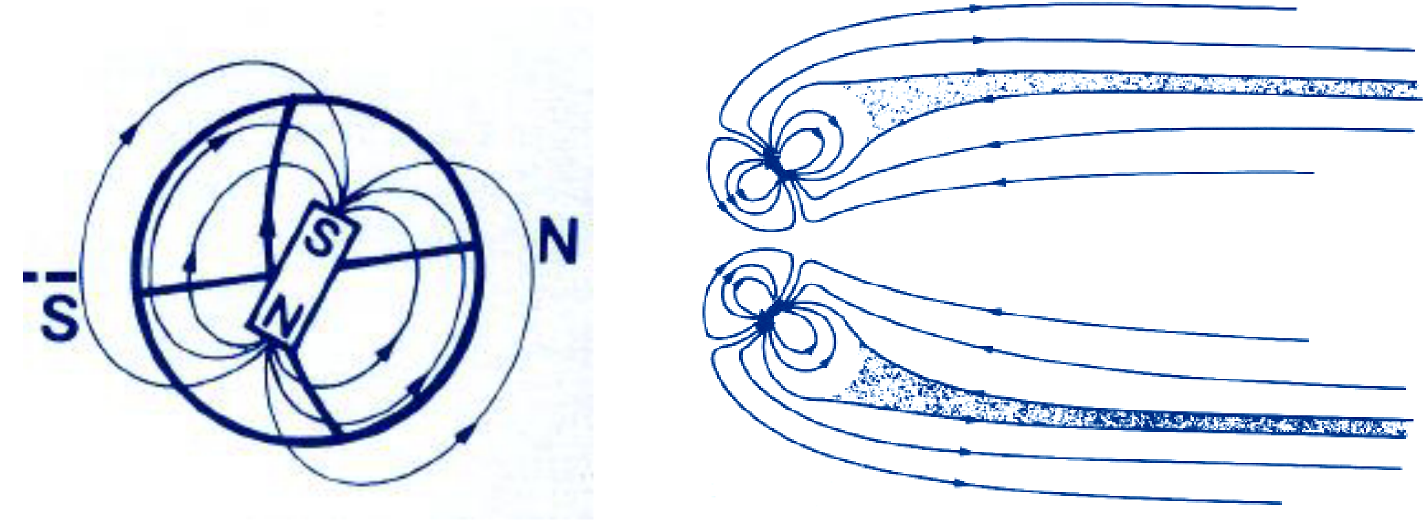


Mientras que se sabe que el planeta tiene una región polar brillante al S, el polo N es más amortiguado, lo que es incompatible con el modelo de cambio estacional descrito, durante el solsticio septentrional de 1944, Urano mostró niveles elevados de claridad, sugiriendo que el polo N no ha sido siempre tan oscuro, esta información implica que el polo visible gana claridad antes del solsticio y oscurece después del equinoccio, los análisis en el espectro visible y microondas revelaron que los cambios periódicos de brillo no son completamente simétricos alrededor de los solsticios, lo que también indica un cambio en los patrones de albedo meridionales, en la década de 1990, mientras Urano se alejaba del solsticio, el Telescopio Espacial Hubble y telescopios terrestres revelaron que el casquete del polo S se oscurecía de forma evidente (excepto el Collar S) mientras que el hemisferio N demuestra cada vez más actividad, como formaciones nubosas y vientos más fuertes, este hecho ocurrió en 2007, cuando el planeta pasaba por un equinoccio, surgiendo un débil Collar en el polo N, mientras que el Collar S llegó a ser casi invisible, aunque el perfil del viento zonal se mantuvo ligeramente asimétrico, con vientos más fuertes en el N con respecto al S; cerca de los solsticios de verano e invierno, los hemisferios de Urano son alternativamente, encarados hacia los rayos del Sol, o de cara al espacio profundo, se cree que la aclaración del hemisferio iluminado por el Sol es el resultado del espesamiento de las nubes de metano y de las capas de niebla situados en la troposfera, el Collar brillante de la latitud de -45° también está conectado con nubes de metano, otros cambios en la región del polo S se pueden explicar por cambios en las capas bajas de nubes, la variación en la emisión de microondas del planeta es causada probablemente por los cambios en la circulación profunda de la troposfera, porque las nubes y la niebla gruesa del polo deben inhibir la convección.

Magnetosfera

Cuando la sonda Voyager-2 tomó las primeras medidas de la magnetosfera, los astrónomos esperaban que el campo magnético de Urano estuviera alineado con el viento solar, ya que entonces se alinearía con los polos del planeta que se encuentran sobre la eclíptica.

Voyager-2 reveló que el campo magnético es también anormal en su posición y características ya que su origen no se encuentra en el centro geométrico del planeta, y además el eje magnético está inclinado 59° respecto del eje de rotación, el dipolo magnético está desplazado hacia el polo S de rotación en casi un tercio del radio planetario, esta geometría inusual tiene como resultado una magnetosfera altamente asimétrica, donde la fuerza del campo magnético en la superficie del hemisferio S puede llegar a ser tan baja como en 0,1 gauss, mientras que en el hemisferio N puede llegar a los 1,1 gauss, el campo medio en la superficie es de 0,23 gauss (en comparación, el campo magnético de la Tierra tiene aproximadamente la misma fuerza en ambos polos, y su ecuador magnético es prácticamente paralelo al ecuador geográfico, una hipótesis es que, a diferencia de los campos magnéticos de los planetas terrestres y los gigantes gaseosos, que se generan dentro de sus núcleos, los campos magnéticos de los gigantes de hielo son generados por movimiento en zonas relativamente poco profundas, como el océano de H_2O-amoniaco.

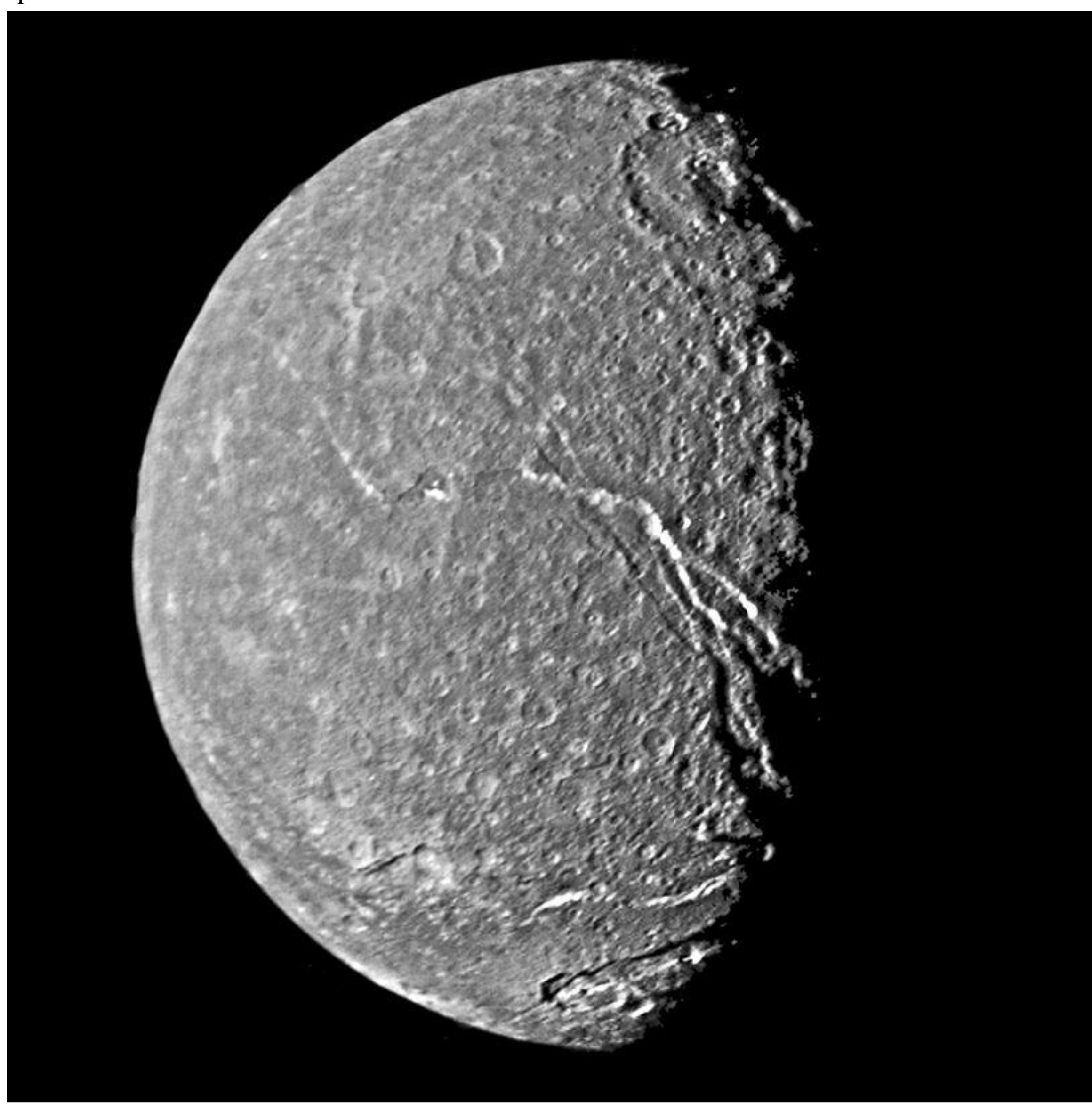


A pesar de su alineación original, en otros aspectos, la magnetosfera de Urano es como las de los otros planetas, tiene un límite exterior situado alrededor de 23 radios por delante, una magnetopausa a 18 radios planetarios, una cola magnética completamente desarrollada y cinturones de radiación, la cola de la magnetosfera sigue detrás del planeta hacia el espacio en una extensión de millones de Km y está atornillada por la rotación del planeta en un largo tirabuzón, contiene partículas cargadas; protones y electrones con una pequeña cantidad de iones H_2^+ (no se han detectado iones más pesados) muchas de estas partículas probablemente proceden de la Corona atmosférica, que contiene temperaturas demasiado calientes, las energías de los iones y electrones pueden llegar a 4 y 1,2 MeV, respectivamente, la densidad de iones de baja energía (por debajo de 1 KeV) en la magnetosfera interior es alrededor de 2 cm^{-3}, la población de partículas está afectada fuertemente por los satélites que barren la magnetosfera dejando huecos detectables, el flujo de partículas es lo suficientemente alto para causar que se oscurezcan o se erosionen las superficies del satélite en un margen de tiempo muy rápido (en términos astronómicos) de 100000 años, puede ser la causa de la coloración uniformemente oscura de los satélites y los anillos, el planeta posee auroras relativamente bien desarrolladas, que se ven como arcos brillantes alrededor de los dos polos magnéticos, las auroras de Urano parecen insignificantes para el balance de energía de la Termosfera planetaria.

Atmósfera de Titania (luna de Urano)

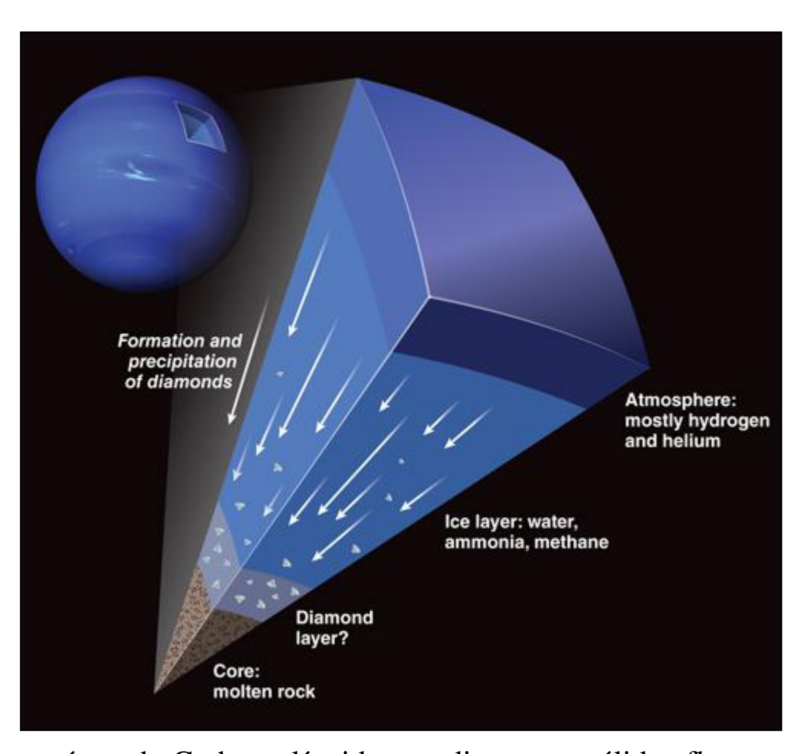
La presencia de dióxido de Carbono en la superficie sugiere que Titania puede tener una tenue atmósfera estacional de dióxido de Carbono y otros gases como Nitrógeno o metano es improbable que estén presentes porque la débil gravedad del satélite no puede evitar que escapen al espacio, datos de 2001 revelaron que no podría haber una atmósfera de más de entre 10 y 20 mbar, este límite superior es varias veces mayor que la máxima presión en superficie de dióxido de Carbono posible, lo que significa que las medidas no ponen restricciones a los parámetros de una posible atmósfera.

La peculiar geometría del sistema de Urano hace que los polos de los satélites reciban más energía solar que las regiones ecuatoriales, como la presión de vapor del dióxido de Carbono aumenta enormemente con la temperatura, significa que se puede acumular dióxido de Carbono en las latitudes bajas, donde puede existir de manera estable en zonas de albedo alto y regiones sombreadas de la superficie en forma de hielo, durante el verano (cuando las temperaturas polares alcanzan los -188/-183 °C, el dióxido de Carbono se sublima y migra al polo opuesto y a las regiones ecuatoriales, dando comienzo a un tipo de ciclo del Carbono, el hielo de dióxido de Carbono acumulado puede ser eliminado por partículas magnetosféricas que erosionan la superficie, se cree que Titania ha perdido una significativa parte de su dióxido de Carbono inicial desde su formación hace 4600 millones de años.



Atmósfera de Neptuno

Su atmósfera forma aproximadamente el 5% al 10% de su masa y se extiende quizás del 10% al 20% hacia el núcleo, donde alcanza presiones de aproximadamente 100000 veces la de la atmósfera terrestre, se ha descubierto concentraciones crecientes de metano , amoníaco y agua (H_2O) en las regiones bajas de su atmósfera, el manto es equivalente a 10 a 15 masas terrestres y es rico en H_2O, amoníaco y metano, esta mezcla se conoce como helada a pesar de que es un fluido caliente y tiene una alta conductividad eléctrica, puede consistir en una capa de H_2O ionizada en la cual las moléculas de H_2O se descomponen en una sopa de iones de Hidrógeno y Oxígeno y en aguas súper ionizadas en las que el Oxígeno se cristaliza pero los iones de Hidrógeno flotan libremente dentro del Oxígeno; a profundidades de 7000 Km, las condiciones pueden ser tales que el metano se descompone en cristales de diamante que llueven como granizo, experimentos de muy alta presión sugieren que la parte superior del manto puede ser un océano de Carbono líquido con diamantes sólidos flotantes, el núcleo de Neptuno probablemente este compuesto de Hierro, Níquel y silicatos, con un modelo interior que da una masa de alrededor de 1.2 veces mayor que la Terrestre, la presión en el centro es de 7 Mbar (aproximadamente el doble que en el centro de la Tierra) y la temperatura puede ser de 5120 °C.



A grandes altitudes, la atmósfera de Neptuno es 80% de Hidrógeno, 19% de Helio y una pequeña cantidad de metano, existen bandas de absorción de metano prominentes a longitudes de onda superiores a 600 nm, en la porción roja e IR del espectro (al igual que con Urano) esta absorción de luz roja por el metano atmosférico es parte de lo que le da su tono azulado, aunque el azul vivo de Neptuno difiere del cian más suave de Urano debido a que el contenido atmosférico de metano de Neptuno es similar al de Urano, se cree que algún componente atmosférico desconocido contribuye al color de Neptuno.

Se subdivide en dos regiones principales: la troposfera inferior, donde la temperatura disminuye con la altitud, y la estratosfera, donde la temperatura aumenta con la altitud, el límite entre las dos es la tropopausa, la estratosfera da paso a la termosfera a una presión inferior a 5-4 bar, la termosfera pasa gradualmente a la exosfera; los modelos sugieren que la troposfera de Neptuno está formada por nubes de diferentes composiciones según la altitud, las nubes de nivel superior se encuentran a presiones, donde la temperatura es adecuada para que el metano se condense, a presiones entre 1 y 5 bares, se cree que se forman nubes de amoníaco y sulfuro de Hidrógeno, por encima de una presión de 5 bar, las nubes pueden consistir en amoníaco, sulfuro de amonio, sulfuro de Hidrógeno y H_2O, probablemente se puedan encontrar a presiones de aproximadamente 50 bar, (donde la temperatura alcanza los 0 °C) nubes más profundas de hielo de H_2O, debajo de estas, se pueden encontrar nubes de amoníaco y sulfuro de Hidrógeno; se han observado y fotografiado nubes de gran altitud que proyectan sombras en la cubierta de nubes opacas, también hay bandas de nubes a gran altitud que se envuelven alrededor del planeta a una latitud constante, estas bandas circunferenciales poseen entre 50/150 Km de ancho y se encuentran a unos 50/110 Km sobre la cubierta de nubes principal, la troposfera, el clima no ocurre en la estratosfera o termosfera superior.



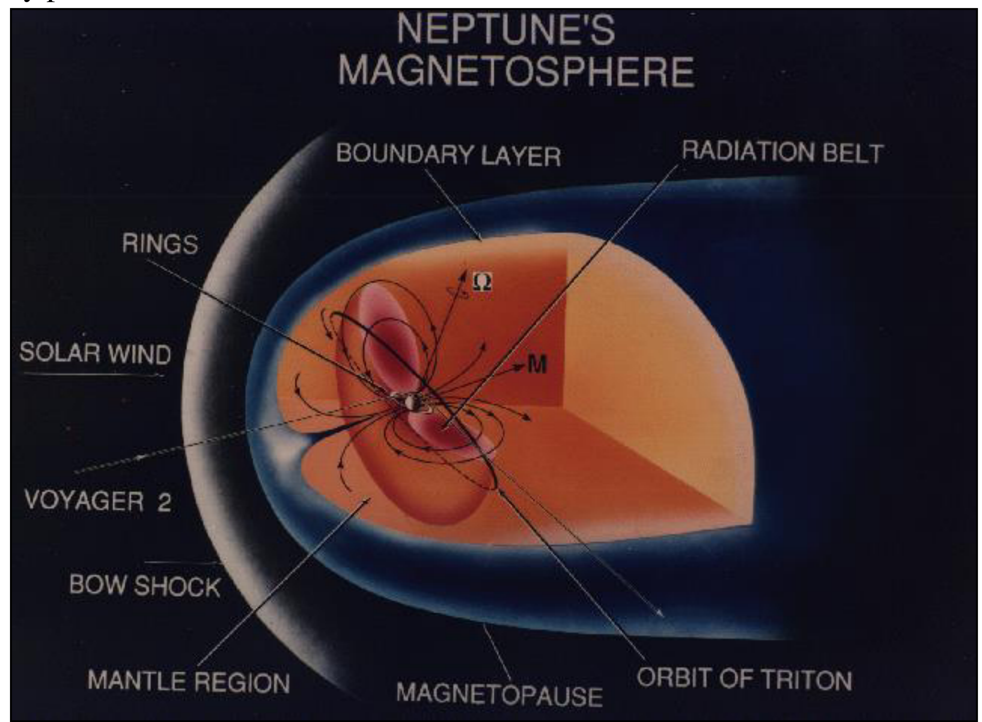
Estudios espectroscópicos sugieren que su estratosfera inferior es nebulosa debido a la condensación de los productos de la fotólisis UV de metano, como el etano y el acetileno, la estratosfera también alberga pequeñas cantidades de monóxido de Carbono y cianuro de Hidrógeno, es más cálida que la de Urano debido a la elevada concentración de hidrocarburos.

Termosfera

Por razones que se desconocen, la termosfera posee una temperatura anormalmente alta de aproximadamente 476 °C (el planeta está demasiado lejos del Sol para que este calor sea generado por la radiación UV) un candidato para un mecanismo de calentamiento es la interacción atmosférica con iones en el campo magnético, otra opción son las ondas de gravedad del interior que se disipan en la atmósfera, la termosfera contiene trazas de dióxido de Carbono y H_2O, que pueden haberse depositado de fuentes externas como meteoritos y polvo.

Magnetosfera

Neptuno es muy similar a Urano en su magnetosfera, con un campo magnético fuertemente inclinado en relación con su eje de rotación (47°) y con un desplazamiento de aproximadamente a 13500 Km del centro físico del planeta, antes de la llegada de la sonda Voyager 2, se planteó la hipótesis de que la magnetosfera inclinada de Urano era el resultado de su rotación lateral, al comparar los campos magnéticos entre los dos planetas, los científicos ahora piensan que la orientación extrema puede ser característica de los flujos interiores de los planetas, el campo magnético es generado por movimientos de fluidos convectivos en una delgada capa esférica de líquidos conductores de electricidad (probablemente una combinación de amoníaco, metano y H_2O) resultando en una acción de dínamo, el componente dipolar del campo magnético en el ecuador es de aproximadamente 14 micro teslas y tiene una geometría compleja que incluye contribuciones relativamente grandes de componentes no dipolares, incluido un momento cuadrupolo fuerte que puede exceder el momento dipolar magnético (la Tierra, Júpiter y Saturno tienen solo momentos cuadrupolo relativamente pequeños, y sus campos están menos inclinados desde el eje polar) el arco de choque de Neptuno (donde la magnetosfera comienza a ralentizar el viento solar) se produce a una distancia de 86000 Km y la magnetopausa (donde la presión de la magnetosfera contrarresta el viento solar) se encuentra a una distancia de 65200 Km del planeta, la cola de la magnetosfera se extiende al menos 177200 Km, y probablemente mucho más.





Clima

El clima de Neptuno se caracteriza por sistemas de tormenta extremadamente dinámicos, con vientos que alcanzan velocidades de casi 2200 Km/h, casi alcanzando un flujo supersónico, al rastrear el movimiento de las nubes se ha demostrado que las velocidades del viento varían de 72 Km/h en dirección E a 1170 Km/h hacia el O, en las cimas de las nubes; los vientos predominantes varían en velocidad desde 1440 Km/h a lo largo del ecuador hasta 900 Km/h en los polos (la mayoría de los vientos se mueven en una dirección opuesta a la rotación del planeta) el patrón general de vientos mostró rotación programada en latitudes altas y rotación retrógrada en latitudes más bajas.

En 2007, se descubrió que la troposfera superior del polo S de Neptuno era más cálida que el resto de su atmósfera, que promedia aproximadamente -200 °C, el diferencial de temperatura es suficiente para permitir que el metano, que en otros lugares está congelado en la troposfera, escape a la estratosfera cerca del polo, la zona caliente se debe a la inclinación axial que ha expuesto el polo S al Sol durante aproximadamente 40 años terrestres, a medida que Neptuno se mueve lentamente hacia el lado opuesto del Sol, el polo S se oscurece y el polo N se ilumina, haciendo que la liberación de metano se desplace hacia el polo; debido a los cambios estacionales, se ha observado que las bandas de nubes en el hemisferio S aumentan de tamaño y albedo, esta tendencia se vio por primera vez en 1980 y se espera que dure hasta el año 2020, el período orbital de Neptuno da como resultado estaciones que duran 40 años terrestres.

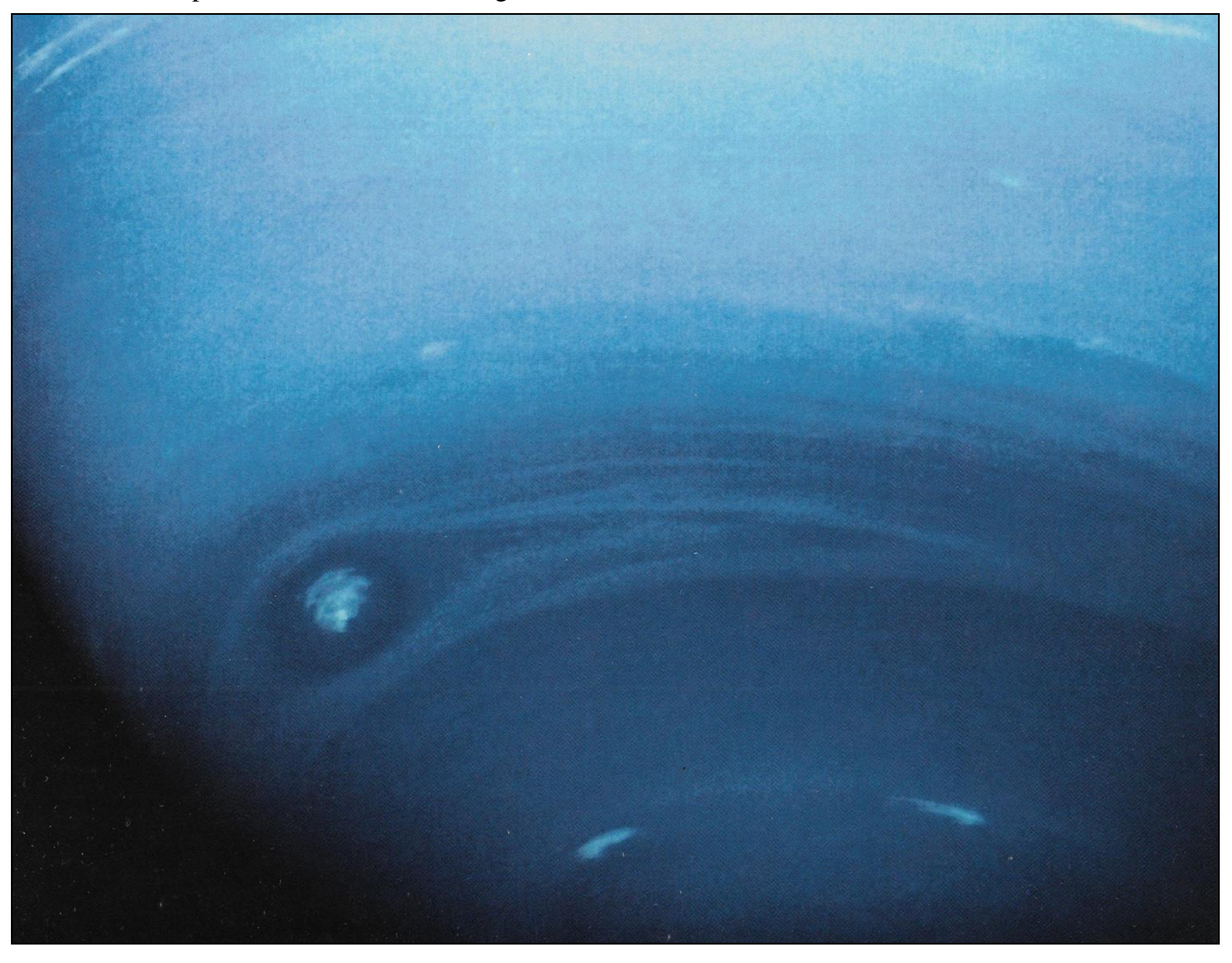


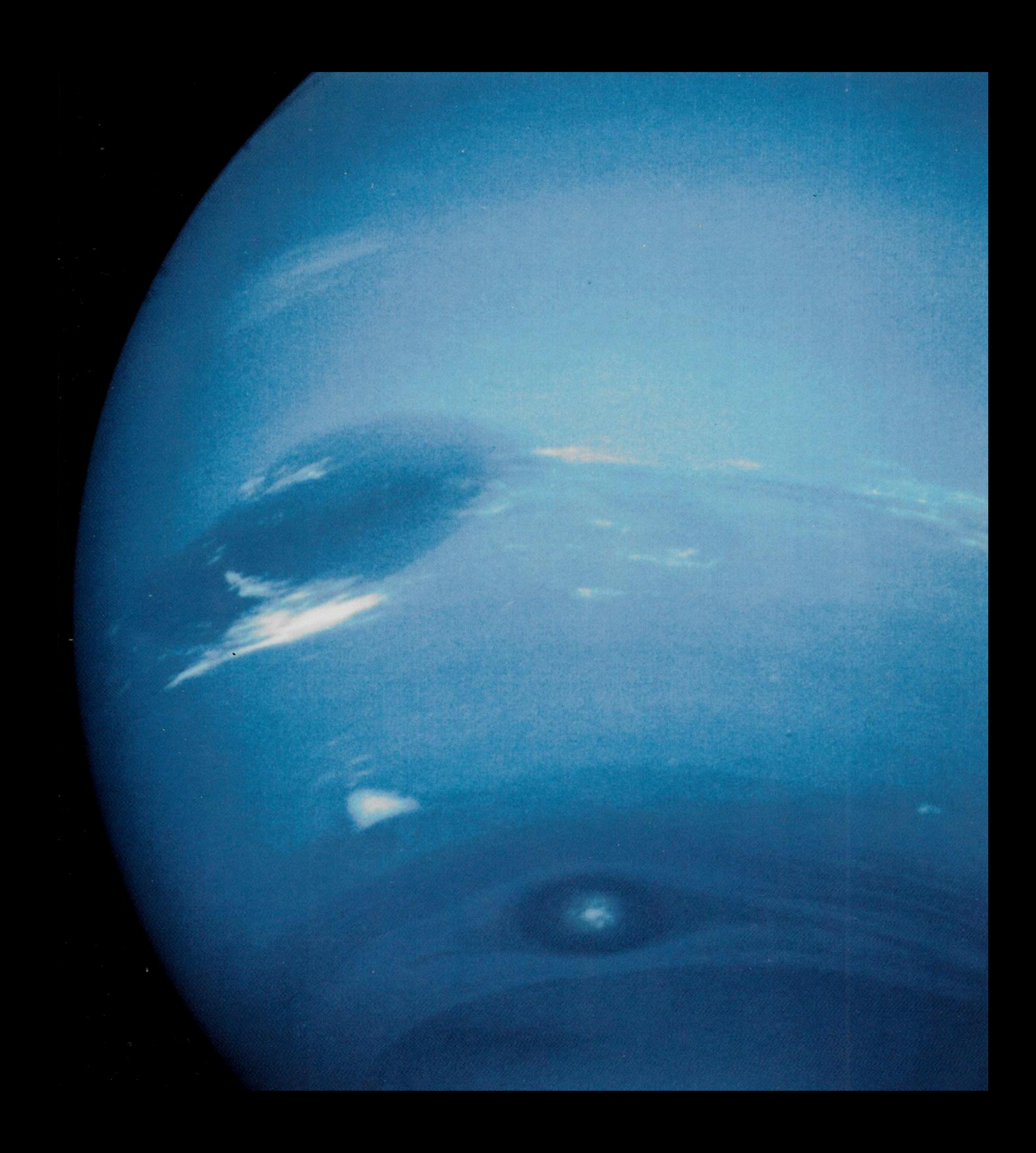
El clima más variado de Neptuno en comparación con Urano se debe en parte a su mayor calentamiento interno, aunque recibe solo el 40% de su cantidad de luz solar, las temperaturas de la superficie de los dos planetas son casi iguales, las regiones superiores de la troposfera de Neptuno alcanzan una temperatura de -221.3 °C) a una profundidad donde la presión atmosférica es igual a 1 bar, la temperatura es -201 °C, más profundo dentro de las capas de gas, la temperatura aumenta constantemente, la fuente de este calentamiento es desconocida, Neptuno irradia aproximadamente 2.61 veces la energía que recibe del Sol, pero su energía interna es suficiente para impulsar los vientos planetarios más rápidos del Sistema Solar, dependiendo de las propiedades térmicas de su interior, el calor sobrante de la formación de Neptuno puede ser suficiente para explicar su flujo de calor actual.

En 1989, la sonda Voyager 2 descubrió un sistema anticiclónico de tormentas denominado Gran Mancha Oscura, sus dimensiones son de 13000×6600 Km; en 1994, el Telescopio Espacial Hubble no observó la Gran Mancha Oscura, pero sí encontró una nueva tormenta similar en el hemisferio N de Neptuno.

Otra tormenta, denominada Scooter, un grupo de nubes blancas más al S que la Gran Mancha Oscura, surgió por primera vez durante los meses previos al encuentro de la nave Voyager 2 en 1989, cuando observaciones dieron cuenta que se movían a velocidades más rápidas y las imágenes adquiridas posteriormente revelarían la presencia de nubes moviéndose incluso más rápido que las que inicialmente habían sido detectadas por la Voyager 2; la Pequeña Mancha Oscura es una tormenta ciclónica cercana al polo S, segunda tormenta más intensa que fue observada durante el sobrevuelo de 1989, inicialmente era completamente oscura, pero cuando la sonda Voyager 2 se acercó al planeta, se desarrolló un núcleo brillante.

Se cree que las manchas oscuras se producen en la troposfera a altitudes más bajas que las características nubes más brillantes, por lo que aparecen como agujeros en las cubiertas de nubes superiores, como son estables pueden durar varios meses, se cree que son estructuras de vórtice, a menudo asociados con las manchas oscuras; hay nubes de metano más brillantes y persistentes que se forman alrededor de la capa de tropopausa, la persistencia de estas nubes muestra que algunos puntos oscuros anteriores pueden continuar existiendo como ciclones a pesar de que ya no son visibles como una característica oscura, las manchas oscuras pueden disiparse cuando migran demasiado cerca del ecuador o posiblemente a través de algún otro mecanismo desconocido.



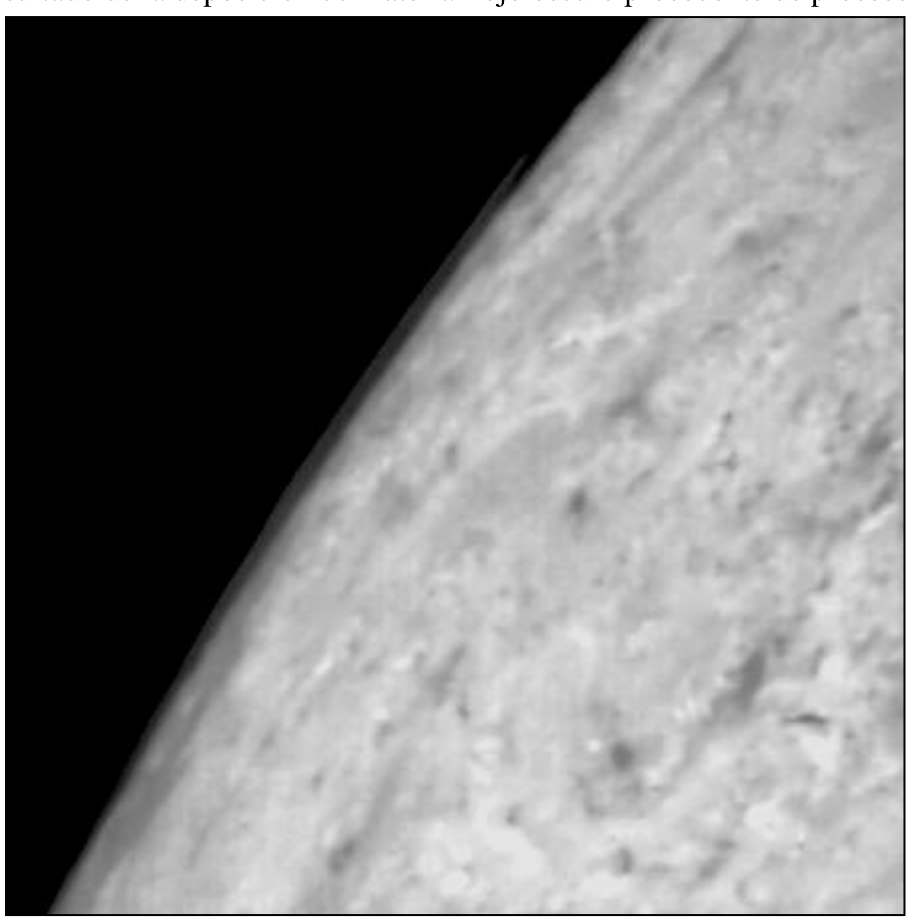


Atmósfera de Tritón (luna de Neptuno)

Tritón tiene una tenue atmósfera de Nitrógeno con trazas de monóxido de Carbono y pequeñas cantidades de metano cerca de su superficie; se cree que la atmósfera fue el resultado de la evaporación del Nitrógeno de su superficie; su temperatura superficial es de aproximadamente -237,6 °C porque el hielo de Nitrógeno está en el estado cristalino hexagonal más cálido, y la transición de fase entre el hielo de Nitrógeno hexagonal y cúbico se produce a esa temperatura; la presión atmosférica en la superficie es de 0,014 a 0,019 mbar.

La turbulencia en la superficie crea una troposfera (región meteorológica) que se eleva a una altitud de 8 Km; las rayas en la superficie dejadas por las columnas de géiseres sugieren que la troposfera está impulsada por vientos estacionales capaces de mover material de más de un micrómetro de tamaño, a diferencia de otras atmósferas, Tritón carece de estratosfera, pero tiene una termosfera a altitudes de 8 a 950 Km y una exosfera por encima.

La temperatura de la atmósfera superior de Tritón, en -178 ±5 °C, es más alta que la de su superficie, debido al calor absorbido de la radiación solar y la magnetosfera de Neptuno, una neblina impregna la mayor parte de la troposfera de Tritón, que se cree que está compuesta en gran parte por hidrocarburos y nitrilos creados por la acción de la luz solar sobre el metano, también tiene nubes de Nitrógeno condensado que se encuentran entre 1 y 3 Km de su superficie; en 1997, se realizaron observaciones desde la Tierra de Tritón cuando pasaba por delante de las estrellas, estas observaciones indicaron la presencia de una atmósfera más densa de la que se dedujo de los datos de la sonda Voyager 2, otras observaciones mostraron un aumento de la temperatura del 5% entre 1989 y 1998; las teorías sobre este calentamiento incluyen un cambio en los patrones de escarcha en la superficie y un cambio en el albedo del hielo, lo que permitiría absorber más calor, otra teoría sostiene que los cambios de temperatura son el resultado de la deposición de material rojo oscuro procedente de procesos geológicos.





Atmósfera de Plutón (planeta enano)

En la década de 1940, Gerard Kuiper buscó evidencia de la atmósfera en el espectro de Plutón, pero sin éxito; en la década de 1970, algunos astrónomos consideraban la hipótesis acerca de una densa atmósfera e incluso océanos de Neón (de acuerdo con algunos puntos de vista de aquellos tiempos, todos los otros gases que son abundantes en el Sistema Solar se congelarían o escaparían, no hay datos observacionales acerca de su atmósfera y composición química que existía en esas épocas).

La primera evidencia (indirecta, porque fue demostrado debido a las ocultaciones de estrellas) de una atmósfera en Plutón apareció en 1976, por medio de la fotometría IR del Telescopio Nicolás U. Mayall, donde se revela la presencia de hielo de metano en la superficie de Plutón, que debe evaporarse de manera significativa por las temperaturas extremas, otras observaciones fueron realizadas el 19-08-1985 por el Observatorio Wise en Israel, pero la calidad de los datos era bastante baja debido a las malas condiciones de observación, además, la descripción detallada fue publicada 10 años más tarde, el 9-07-1988.

La existencia de la atmósfera fue convincentemente demostrada por medio de observaciones de una nueva ocultación, los mejores datos fueron obtenidos por el Observatorio Kuiper Airbone, la escala de la altura de la atmósfera se midió, y se dio la posibilidad de calcular la razón de la temperatura en el sentido de masa molecular; la temperatura y presión de los mismos eran imposible de calcular en ese momento debido a la ausencia de datos sobre la composición química de la atmósfera y de gran incertidumbre en el radio y la masa de Plutón.

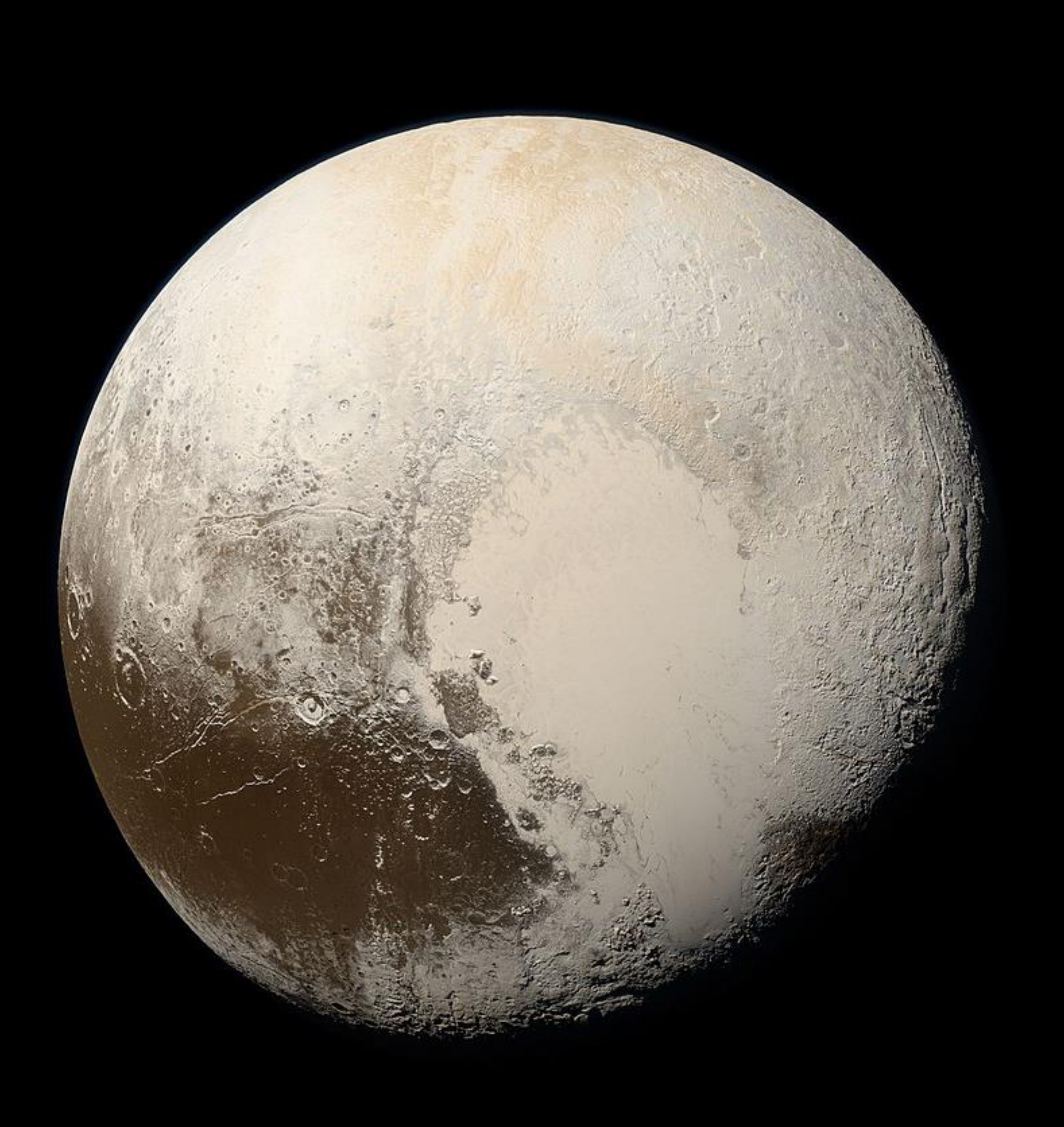
En 1992 se resolvió la composición química, debido a la exploración de espectro IR desde el Telescopio IR del Reino Unido, la superficie de Plutón resultó ser cubierta principalmente por hielo de Nitrógeno, ya que el Nitrógeno es, además, más volátil que el metano, esta observación implícita la prevalencia de Nitrógeno también en la atmósfera (aunque el Nitrógeno gaseoso no fue visto en el espectro), junto a esto, fue descubierto también una pequeña mezcla de hielos de monóxido de Carbono, y en el mismo año, observaciones desde la Instalación de Telescopio IR de la NASA, revelaron la primera evidencia concluyente de metano gaseoso.

En 2006, observaciones desde la Red Submilimétrica tuvieron éxito en la separación de las emisiones de Plutón y Caronte, y una temperatura media de la superficie de Plutón se midió alrededor de -231 ±4 °C; más frío de lo esperado, tal vez, la diferencia fuese causada por el enfriamiento de la sublimación del hielo de Nitrógeno.

Ocultaciones observadas el 20-07 y el 21-08-2002 por equipos del Instituto Tecnológico de Massachusetts y el Observatorio de París demostraron que la presión atmosférica resultó ser de alrededor de dos veces más que en 1988, el procesamiento de estos datos demostraría que la presión seguía aumentando, otra ocultación estelar observada 29/30-06-2015 (dos semanas antes del encuentro de la sonda New Horizons) calculó la presión en la superficie en 1.8^{-5} bares.

El 14-07-2015, la sonda New Horizons hizo las primeras exploraciones de la atmósfera de Plutón, desde una corta distancia, incluyendo mediciones de ocultaciones de radio y observaciones de debilitamiento de la radiación solar durante el vuelo a través de la sombra de Plutón, proporcionó las primeras mediciones directas de los parámetros de la atmósfera inferior.

La estimación preliminar de la presión en la superficie es de aprox. 0,01 mbar; casi dos veces menor que la de algunas de las anteriores estimaciones de ocultaciones estelares; las causas de esta discrepancia no están claras todavía; la presencia de gases atmosféricos fue rastreado a la altitud de 1670 Km.

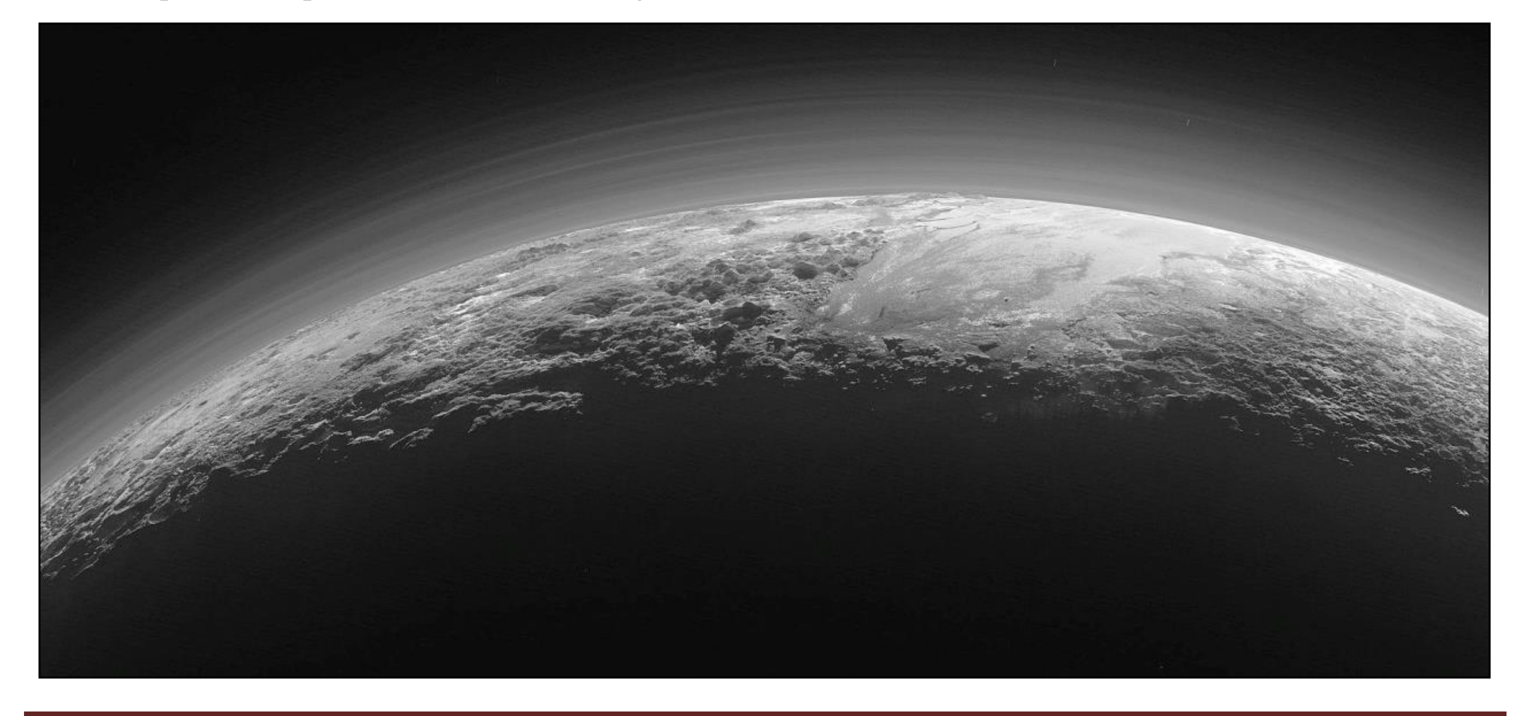


El compuesto más volátil de la atmósfera de Plutón es el Nitrógeno, le sigue el monóxido de Carbono y luego el metano, el indicador de volatilidad es la presión de vapor saturada (sublimación por presión), a una temperatura de -223 °C es alrededor de $0,1^{-4}$ bar; para el Nitrógeno $0,1^{-5}$ y 0.1^{-8} bar para el metano; se incrementa rápidamente con la temperatura, y en -273 °C (cerca del valor máximo) se aproxima a 0,1; 0,03 y $0,1^{-5}$ bares, respectivamente; para los hidrocarburos más pesados que el metano, amoníaco, agua, dióxido de carbono y cianuro de hidrógeno, esta presión sigue siendo muy baja, lo que indica ausencia de condiciones para la volatilidad en Plutón (al menos en la fría atmósfera inferior), la cantidad de etileno es acerca de 0,0001 %, y la cantidad de acetileno es de 0,0003 %, estos compuestos se precipitan lentamente en la superficie y probablemente, también se incluyan tolinas, que serían responsables del color marrón de la superficie de Plutón.

Debido a su menor abundancia y volatilidad, el metano y el monóxido de Carbono, podría esperarse que demostraran más fuertes desviaciones de equilibrio de presión con los hielos superficiales y grandes variaciones temporales y espaciales de la concentración, pero en realidad la concentración de, al menos, el metano, no depende notablemente de la altura (zona inferior de 20-30 Km), longitud y el tiempo. Sin embargo la dependencia de la temperatura de la volatilidad de metano y Nitrógeno sugieren que la concentración de metano disminuirá durante la órbita de Plutón hacia la zona más alejada del Sol.

Los cambios estacionales y orbitales resultados de la insolación en la migración de los hielos superficiales: se subliman en algunos lugares y condensan en otro, según algunas estimaciones, causa cambios de varios metros en su espesor demostrando cambios apreciables de brillo y color de Plutón.

El metano y el monóxido de Carbono, a pesar de su baja cantidad, son importantes para la estructura térmica de la atmósfera: el metano es un fuerte agente de calefacción y el monóxido de Carbono es un agente de enfriamiento; la sonda New Horizons descubrió en la atmósfera de Plutón múltiples capas de neblina que cubren todo el planeta y que alcanza una altitud de 150 Km, probablemente compuestas de partículas de los compuestos no volátiles, que son sintetizados a partir de los gases atmosféricos bajo la influencia cósmica de alta energía de la radiación, las capas se pueden formar debido a las ondas de gravedad (presencia que es sugerido también por observaciones de ocultaciones); a pesar de la muy baja densidad atmosférica, la niebla es bastante apreciable, aún dispersa la luz suficiente para dar la posibilidad de observar algunos detalles del lado nocturno de Plutón.



Probablemente, la bruma es la razón de una caída en la curva de intensidad de la luz frente al tiempo obtenido por New Horizons durante el vuelo a través de la sombra de Plutón (por debajo de la altitud de 150 Km) de la atmósfera que atenúa la luz mucho más fuerte, una caída similar, se observó durante la ocultación estelar en 1988, interpretado como un debilitamiento de la luz por la bruma; la altura de la capa, que creó la caída, relativa a la superficie fue imposible de determinar en esos momentos, debido a la incertidumbre del radio de Plutón, pero fue posible calcular su distancia del centro de Plutón, y sustrayendo la estimación moderna del radio se le da altura a 24 Km, por lo que, esta niebla es indistinguible de la superficie de Plutón; otra evidencia de la neblina se obtuvo en 2002, debido a una nueva ocultación: la parte de la luz estelar, que incluso en el medio del evento llegó a la Tierra (debido a la refracción en la atmósfera de Plutón), demostró un aumento de la intensidad con la longitud de onda; fue interpretado como una confiable evidencia de la dispersión de la luz por un aerosol, pero esta característica estuvo ausente durante los próximos eclipses, y el 14-07-2015 la sonda New Horizons encontró que la neblina era azul; el tamaño de las partículas de neblina no está claro, su color azul indica un radio de partícula cercano a los 10 nm, pero la relación de brillos en diferentes ángulos de fase indica un radio superior a los 100 nm.



Plutón no tiene ninguna o casi ninguna troposfera; las observaciones realizadas por la sonda New Horizons sugieren una fina capa límite troposférica de 4 Km de espesor y una temperatura de -236 °C; por encima de esta capa se establece otra (la estratosfera) con un rápido incremento de la temperatura con la altura, resultado de un efecto invernadero causado por el metano; la temperatura de las capas superiores de la atmósfera no muestra grandes cambios temporales; en 1988, 2002 y 2006 fue constante, estando en alrededor de -173 °C, a pesar del aumento del doble de la presión (la temperatura media de la superficie es de -233 °C (medido en 2006), y el valor de la media para toda la atmósfera es de -178 °C (medido en 2008).

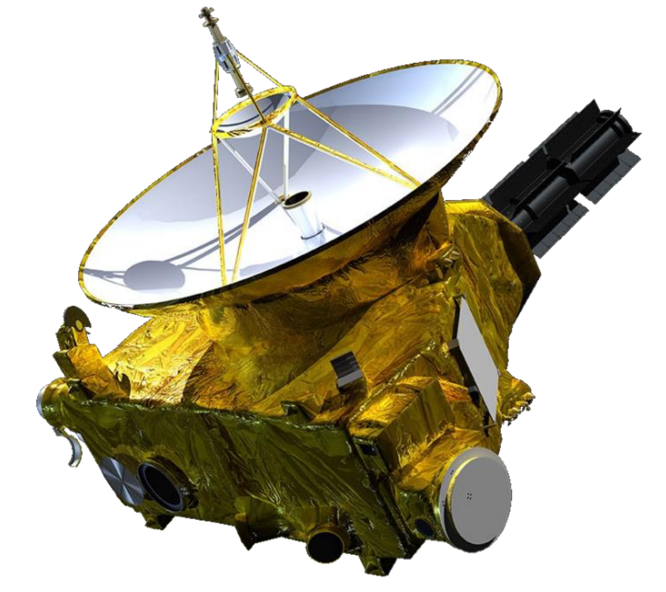
En la estratopausa (20 a 40 Km de altura) la temperatura alcanza su máximo de -173 °C y luego disminuye lentamente (en la mesosfera), las causas de esta disminución puede estar relacionada con la acción de enfriamiento del monóxido de Carbono, cianuro de hidrógeno o por otras razones; por encima de los 200 Km se alcanza una temperatura de aproximadamente -193 °C y, a continuación, permanece constante.

Los datos existentes en 2014, permitieron la construcción de estos modelos de los cambios estacionales en la atmósfera; durante el paso por su afelio (en 1865 por última vez) una cantidad significativa de la volatilidad de los hielos estaba presente en ambos hemisferios N y S; aproximadamente en el mismo tiempo ocurrió el equinoccio, y en el hemisferio S se inclinó su eje hacia el Sol; los hielos locales comenzaron a emigrar hacia el hemisferio N, y cerca de 1900, el S se convirtió en gran parte desprovista de ellos.

Después del equinoccio (1987) el hemisferio S se alejó del Sol, pero su superficie ya era sustancialmente climatizada, y su gran inercia térmica (proporcionado por hielo de agua no volátil) ralentizó considerablemente su enfriamiento; es por eso que los gases (que ahora se evaporan de forma intensiva en el hemisferio N), no se pueden condensar rápidamente en el S, y que se acumulan en la atmósfera, aumentando su presión.

Los primeros datos sugeridos por la sonda New Horizons (única sonda que ha explorado este planeta) son que la atmósfera pierde de 50 a 500 Kg de moléculas de Nitrógeno/seg., una cantidad correspondiente a la pérdida de la capa superficial de hielos volátiles de metros o Km. Sin embargo, datos posteriores revelaron que esta cifra fue sobreestimada; la atmósfera de Plutón está perdiendo en la actualidad el $1x10^{23}$ moléculas de Nitrógeno/seg., y $5x10^{23}$ de metano/seg., lo que sería una pérdida de varios cm de hielo de Nitrógeno y algunos metros de hielo de metano durante el tiempo de vida del Sistema Solar.

Las moléculas con velocidad suficiente alta, las cuales se escapan al espacio exterior, son ionizadas por la radiación UV solar; como el viento solar se encuentra con el obstáculo formado por los iones, se frena y desvía, posiblemente formando una onda de choque; los iones son recogidos por el viento solar y lo lleva en su flujo que rodea al planeta Plutón para formar una cola de iones o plasma, el instrumento analizador del viento solar (SWAP) de la sonda New Horizons hizo las primeras mediciones de esta región donde los iones atmosféricos tenían baja energía; después de su máximo acercamiento (14-07-2015), permitió determinar la velocidad a la que Plutón pierde su atmósfera y, a su vez, dar una idea o hipótesis sobre la evolución de la atmósfera y su superficie.



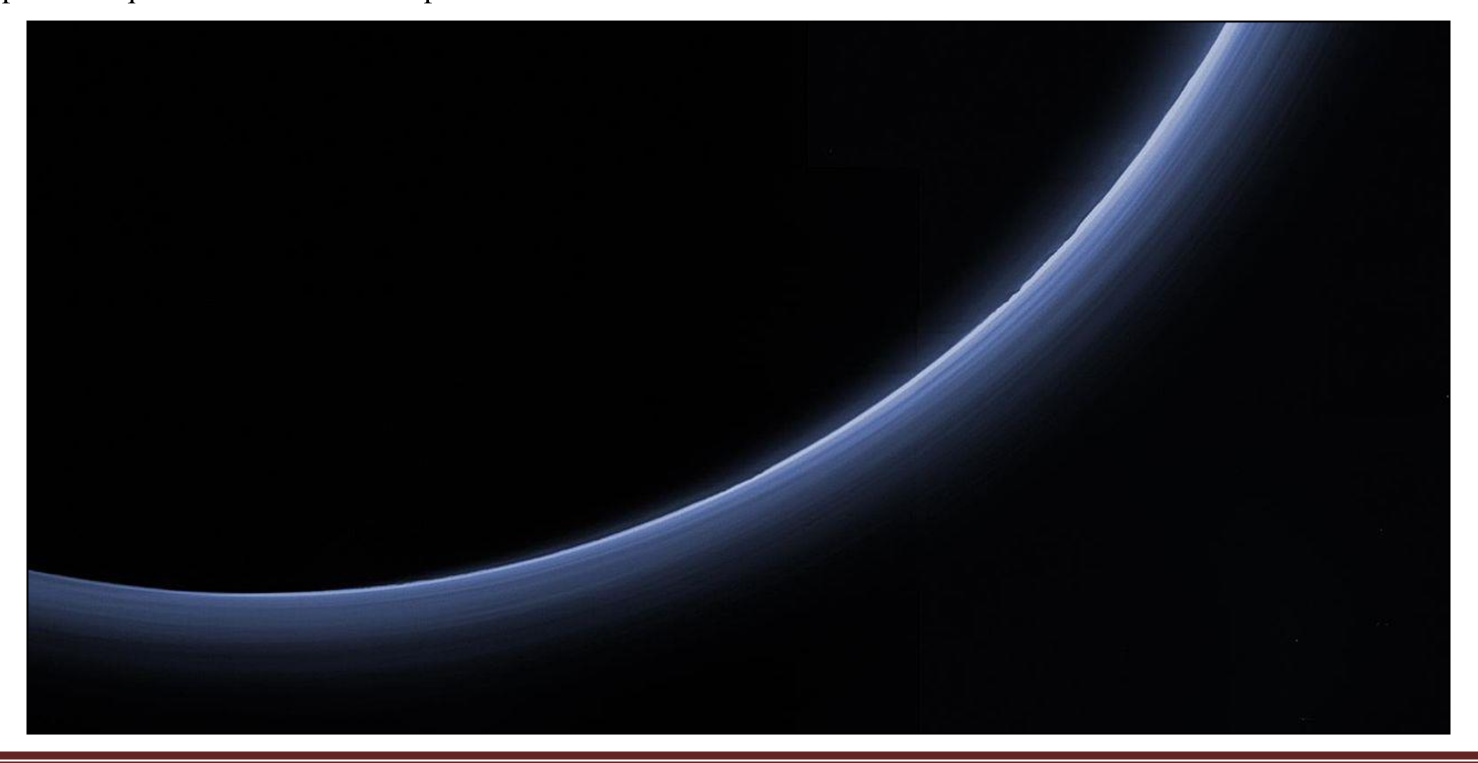
La presión atmosférica de Plutón es muy baja y fuertemente dependiente del tiempo; observaciones estelares de las ocultaciones por Plutón muestran que el aumento de alrededor de tres veces entre 1988 y 2013 (a pesar de que Plutón se está alejando del Sol desde 1989) es probablemente causado por el polo N de Plutón entrando en la luz del Sol en 1987, lo cual intensificó la evaporación de Nitrógeno desde el hemisferio N, mientras que el polo S está todavía demasiado caliente para la condensación del Nitrógeno.

Los valores absolutos de presión en la superficie son difíciles de obtener a partir de los datos de ocultación, debido a que estos datos no suelen llegar a las capas más bajas de la atmósfera, así, la presión en la superficie tiene que ser extrapolada, y esto es un poco ambiguo, debido a que no está totalmente clara la dependencia de la altura de la temperatura y, en consecuencia, de la presión.

El radio de Plutón también debe ser conocido, pero fue mal limitado antes de 2015; así, los valores precisos de presión en la superficie eran imposibles de calcular en épocas anteriores (para algunas ocultaciones desde 1988, la presión fue calculado para un nivel de referencia de 1275 Km desde el centro de Plutón -luego resultó ser de 1187 ±4 Km-); una ocultación el 29/30-06-2015, poco antes del sobrevuelo de la sonda New Horizons, proporcionó una presión en la superficie de 0,02 mbar.

Los primeros datos directos y fiables sobre la parte inferior de las capas de la atmósfera de Plutón fueron obtenidos por la sonda New Horizons en 14-07-2015 gracias a las mediciones de radio-ocultación. La presión en la superficie se estimó en 0,01 mbar, dato consistente con los de ocultaciones de años anteriores, pero algunos de los cálculos basados en estos valores dieron resultados mayores; posiblemente la presión disminuyó abruptamente, o que la discrepancia es el resultado de los mencionados problemas con la calibración de los datos de la ocultación.

Debido a la excentricidad orbital en el afelio (Plutón recibe 2,8 veces menos calor que en el perihelio), debería provocar fuertes cambios en su atmósfera, aunque los detalles de estos procesos no son claros; se pensó que en el afelio, la atmósfera debe en gran medida de congelarse y caer en la superficie (esto es sugerido por la fuerte dependencia de la temperatura de sublimación de la presión de sus compuestos), pero los modelos más elaborados predicen que Plutón tiene una importante atmósfera durante todo el año.



Atmósfera de Caronte

La luna más grande de Plutón, Caronte no tiene una atmósfera significativa; se ha especulado sobre una minúscula exosfera que la rodea, pero no ha habido indicios de nada sustancial; Plutón tiene una atmósfera delgada pero significativa y, bajo algunas condiciones, la gravitación de Caronte atrae parte de la atmósfera superior de Plutón, específicamente Nitrógeno, de las formaciones de hielo de Plutón, hacia la superficie de Caronte; la mayor parte del Nitrógeno queda atrapado en el centro de gravedad combinado entre los dos cuerpos antes de llegar a Caronte, pero cualquier gas que llegue a Caronte se mantiene pegado a la superficie, el gas se compone principalmente de iones de Nitrógeno, pero las cantidades son insignificantes en comparación con el total de la atmósfera de Plutón.

Las numerosas firmas espectrales de formaciones de hielo en la superficie de Caronte han llevado a algunos a creer que las formaciones de hielo podrían proporcionar una atmósfera, pero las formaciones que suministran atmósfera no han sido confirmadas todavía.

Muchos científicos teorizan que estas formaciones de hielo podrían estar ocultas fuera de la vista directa, ya sea en cráteres profundos o debajo de la superficie, de manera similar a cómo Plutón transfiere atmósfera a Caronte, la gravedad relativamente baja de Caronte, debido a su baja masa, hace que cualquier atmósfera que pueda estar presente escape rápidamente de la superficie al espacio, incluso mediante la ocultación estelar, que se utiliza para sondear la atmósfera de los cuerpos estelares, los científicos no pueden confirmar la existencia de una atmósfera.

Caronte también actúa como protector de la atmósfera de Plutón, bloqueando el viento solar que normalmente chocaría con Plutón, dañando su atmósfera, dado que Caronte bloquea estos vientos solares, su propia atmósfera se ve disminuida, en lugar de la de Plutón, este efecto es también una explicación potencial seria para la falta de atmósfera de Caronte; cuando comienza a acumularse, los vientos solares lo apagan.

Ha habido pruebas significativas de dióxido de Carbono y vapor de agua en la superficie de Caronte, pero estos vapores no son suficientes para una atmósfera viable debido a sus bajas presiones de vapor, la superficie de Plutón tiene abundantes formaciones de hielo, pero éstas son volátiles, ya que están formadas por sustancias volátiles como el metano, estas estructuras de hielo volátiles provocan una gran cantidad de actividad geológica, y mantiene de manera constante su atmósfera, mientras que las estructuras de hielo de Caronte están compuestas sobre todo agua y dióxido de Carbono, y mucho menos sustancias volátiles que pueden permanecer latentes y no afectar mucho a la atmósfera.

El mapeo fotométrico de la superficie de Caronte muestra una tendencia latitudinal en el albedo, con una banda ecuatorial brillante y polos más oscuros; la región del polo N está dominada por una zona oscura muy grande; la explicación para esta característica es que se forma por la condensación de gases que escaparon de la atmósfera de Plutón, en invierno, la temperatura es de -258 °C y estos gases, que incluyen Nitrógeno, monóxido de Carbono y metano, se condensan en sus formas sólidas; cuando estos hielos se someten a la radiación solar, reaccionan químicamente para formar varias tolinas rojizas; más tarde, cuando el Sol vuelve a calentar el área a medida que cambian las estaciones de Caronte, la temperatura en el polo aumenta a -213 °C, lo que hace que los volátiles se sublimen y escapen de Caronte, dejando solo las tolinas; durante millones de años, el tolin residual acumula capas gruesas que oscurecen la corteza helada; también la sonda New Horizons encontró evidencia de una extensa geología pasada que sugiere que Caronte probablemente esté diferenciado; en particular, el hemisferio S tiene menos cráteres que el N y es considerablemente menos accidentado, lo que sugiere que en algún momento del pasado ocurrió un evento de resurgimiento masivo, tal vez provocado por la congelación parcial o total de un océano interno, que eliminó muchos de los cráteres anteriores.



Atmósfera de los cometas (Coma)

Los cometas, al igual que los planetas, están hechos de materia procedente de una nube molecular que colapsó para dar origen a nuestro sistema solar; esos planetesimales helados no han pasado por procesos de diferenciación gracias a su pequeño tamaño; se han almacenado en las regiones más exteriores y, por tanto, más frías, del Sistema Solar (cinturón de Kuiper y nube de Oort), por lo tanto, su composición inicial debe permanecer sin cambios y así dar testimonio del entorno físico y químico que prevalece en la región de la nebulosa solar en la que se formaron.

Algunos incluso podrían mantener la misma composición que nuestra nube molecular natal; los cometas son considerados como los archivos más antiguos de nuestro sistema planetario; una perturbación gravitacional o una colisión pueden expulsar el núcleo de un cometa fuera de su depósito y colocarlo en una órbita elíptica que lo llevará cerca del Sol.

Esta aproximación provoca la sublimación de los hielos, primero Carbono, luego agua y otros compuestos volátiles que se congelan lejos del Sol y conduce a la formación de la atmósfera cometaria (coma) y de las colas que a veces se pueden ver a simple vista desde la Tierra.

Se han detectado compuestos orgánicos con pesos moleculares superiores a los observados mediante métodos de teledetección (desde la Tierra o desde instrumentos de sondas espaciales) mediante espectrometría de masas, sobre todo con el instrumento RPA2-PICCA a bordo de la sonda europea Giotto, analizador electrostático de iones pesados diseñado para identificar la composición y distribución de iones térmicos positivos en la coma del cometa Halley (el instrumento aprovecha la gran velocidad relativa de paso y el hecho de que los iones en la coma interna deben tener temperaturas bajas y estar predominantemente con carga simple, las mediciones de energía y carga pueden estar directamente relacionadas con la distribución de masa de los iones); las primeras interpretaciones de los espectros de masas de iones pesados dio como resultado la presencia de polioximetileno (POM, polímero de formaldehído); además, las mediciones con el Espectrómetro de Masas Neutras, también a bordo de la Giotto, mostraron que el formaldehído en el Halley podría ser producido por una fuente extendida a lo largo de la coma del cometa (la distribución espacial del formaldehído en la coma no es compatible con una emisión del núcleo únicamente; y apoya la hipótesis de que hay al menos una fuente adicional que produce este elemento a medida que se propaga hacia afuera desde el núcleo (denominado fuente extendida).

El instrumento PUMA a bordo de la sonda soviética Vega 1, fue concebido para analizar la composición de los granos de polvo cometario; para interpretar los espectros de masas de PUMA se formularon hipótesis sobre los procesos repentinos de disipación de energía cerca de superficies sólidas después de un impacto para deducir las reglas de formación de iones moleculares, estos impactos se producen cuando una partícula de polvo golpea el objetivo del espectrómetro de masas; esta hipótesis arroja una buena concordancia entre sus predicciones y otras observaciones para moléculas pequeñas.

Para las moléculas más grandes, el problema es más complejo, ya que no pueden sobrevivir al proceso de impacto sin fragmentarse, además de la dificultad de ensamblar correctamente los fragmentos para reconstituir la molécula original, la naturaleza de los propios fragmentos es incierta, ya que varios fragmentos tienen la misma masa (a resolución del espectrómetro). Sin embargo, lo que los espectros de masas de PUMA muestran claramente que en los granos hay compuestos con estructura compleja y grandes masas moleculares.

Todas las moléculas detectadas con espectrometría de masas en las proximidades del cometa Halley muestran que los cometas son extremadamente ricos en términos de composición orgánica y, por tanto, de gran interés para los estudios de astrobiología.



La interacción del viento solar con la coma del cometa Churyumov-Gerasimenko fue registrada localmente por la sonda Rosetta en 2014, cuando el cometa estaba aproximadamente a 3,6 U.A. (Unidades Astronómicas) del Sol, con la observación de iones de agua acelerados, así como la descomposición de volátiles mediante la combinación de fotoionización y disociación por impacto de fotoelectrones; inicialmente, el viento solar impregna la delgada atmósfera del cometa formada por sublimación, hasta que el tamaño y la presión del plasma de la atmósfera ionizada definen sus límites y nace una magnetosfera; utilizando el analizador de composición iónica de la sonda Rosetta se realiza la primera detección de iones de agua hasta el momento en que la atmósfera comienza a repeler el viento solar (alrededor de 3,3 U.A.), la población de agua cercana al cometa comprende iones acelerados (menor a 800 eV).

Se descubrió que las interacciones iniciales del cometa con el viento solar eran muy turbulentas y más fuertes de lo esperado, y la observación de electrones supratérmicos era compatible con cometas de actividad mucho mayor (la desgasificación del cometa Churyumov-Gerasimenko es 100 veces menor que el cometa Halley).

El acceso a altitudes cercanas al núcleo (menos de 30 Km) del cometa de baja actividad facilitó el estudio de la química iónica neutra, que reveló inconsistencias con las predicciones del modelo relacionadas con una coma heterogénea, así como la observación de iones de Hidrógeno formados por intercambio de doble carga del viento solar con moléculas de la coma; estas distancias también facilitaron la observación de la interacción directa del viento solar con el núcleo, lo que resultó en la pulverización de polvo y reveló que los refractarios del cometa tienen abundancias de Sodio similares a las de las condritas carbonosas, un agotamiento de Calcio y un exceso de Potasio.

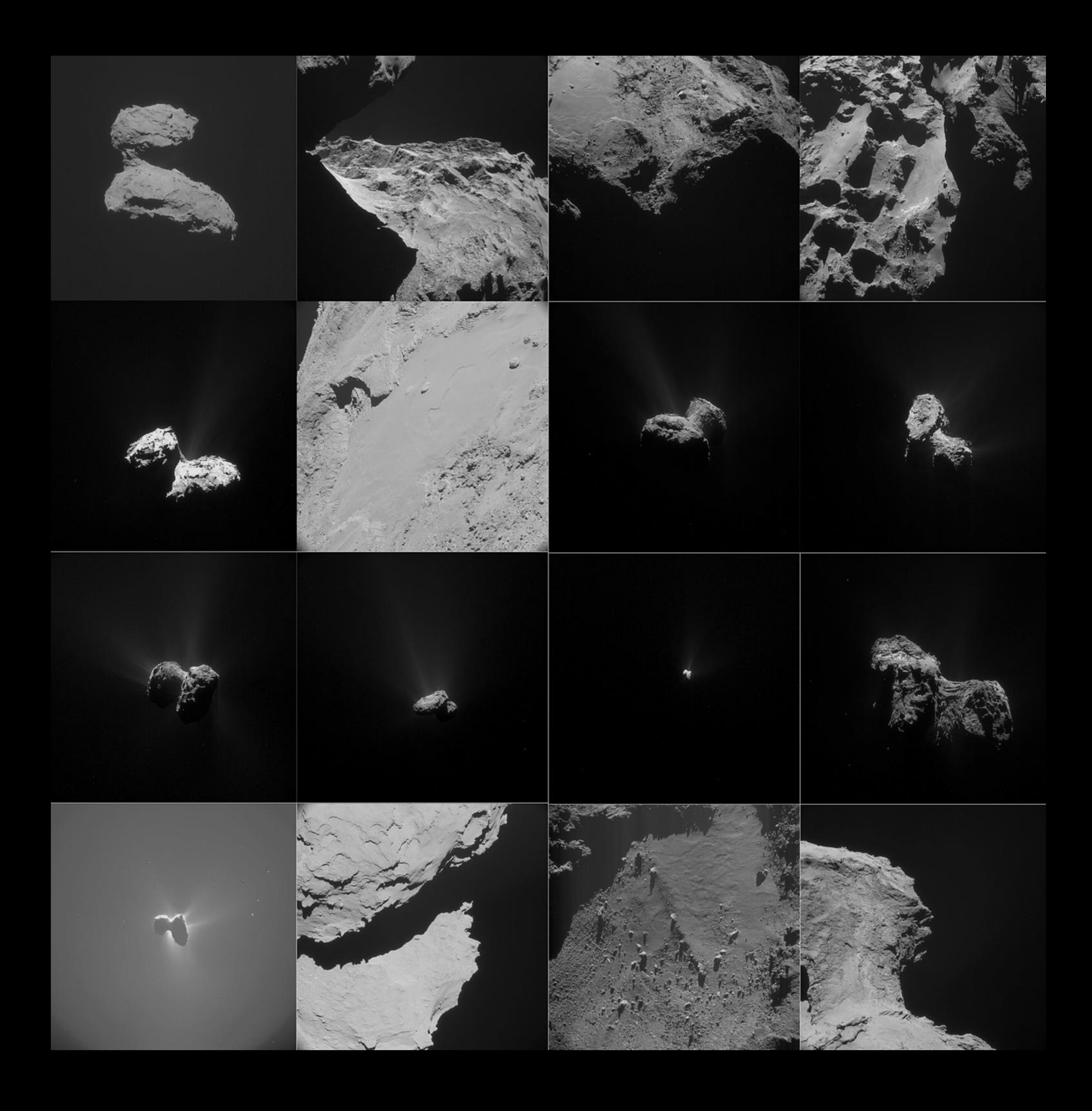
La primera medición de iones se informó en aproximadamente 3,5 U.A.; de 3,6 a 2,7 U.A. se detectaron oscilaciones magnéticas de compresión de baja frecuencia a aproximadamente 40 Mhz, donde las inestabilidades clásicas impulsadas por iones no pudieron explicar las observaciones y en su lugar se produjo un campo cruzado.

La inestabilidad fue sugerida como una posible fuente, estas ondas también se investigaron utilizando la sonda Philae y Rosetta durante el aterrizaje de Philae, revelando que ondas de longitud de onda de 278 Km tenían una velocidad de fase de aproximadamente 6 Km/s^{-1}.

El flujo de iones de agua acelerados (con energía menor a 120 eV) aumentó con la aproximación al Sol (3,6 a 2,0 U. A.), observándose una importante desviación del viento solar, hasta 45° desde la dirección antisolar (en algunos casos más de 50°), con cambios en la deflexión asociados con los cambios en el componente ortogonal del campo magnético interplanetario.

La distribución espacial del plasma de baja energía (de 1 a decenas de eV) en las proximidades del núcleo estaba muy estructurada (con fuertes picos en el hemisferio N), lo que indicaba claramente que la fuente principal era la ionización de la coma neutra; la densidad electrónica exhibió una caída de 1/R con la distancia, como se esperaba de la ionización de un gas neutro en expansión, aunque esto también podría ser una combinación de los efectos del campo eléctrico y el transporte del viento solar.

No se observaron límites entre el viento solar y el coma cometario ni firmas de regiones de plasma separadas más allá de 3,1 U.A.; el potencial de la sonda Rosetta permaneció negativo a 50 Km del núcleo y la densidad del plasma aumentó, más significativamente en el hemisferio S, en consonancia con el aumento de la insolación y los efectos estacionales en el núcleo.





Noticias

Contenidos astronómicos educativos

Por medio del canal de la plataforma Youtube que posee la Sociedad Lunar Argentina, podrá disfrutar de una gran cantidad de videos relacionados a la astronáutica y astronomía.

Paseo por la Luna Creciente https://www.youtube.com/watch?v=TNfw6CUSNBc

Paseo por Mare frigoris https://www.youtube.com/watch?v=wYcWnqpf_Dw

Paseo por Mare Crisium https://www.youtube.com/watch?v=3GNlaPnyVwY

Paseo por la Luna Creciente (4° noche) https://www.youtube.com/watch?v=__j5waKDY9A

El misterio de Reiner Gamma https://www.youtube.com/watch?v=zv-xX4nv8i4

Fenómenos Lunares Transitorios (FLT) https://www.youtube.com/watch?v=yPMU1OFPd8w

Estudio científico de los FLT https://www.youtube.com/watch?v=UO8UFoQen7E

Selenografía https://www.youtube.com/watch?v=Ydq6eYM7OMQ

Observación amateur de la Luna https://www.youtube.com/watch?v=ttCN_hWf8R4

Observación lunar por aficionados (Dial Radio/TV) https://www.youtube.com/watch?v=LeGtfCrefTs

Artemis 1, la reconquista de la Luna https://www.youtube.com/watch?v=MNAExx9N0JQ

Rovertito, un proyecto lunar argentino https://www.youtube.com/watch?v=F_7MRfraM7E

Bases lunares 1, historia y perpectivas https://www.youtube.com/watch?v=rELeiz6pimw

Bases lunares 2, desafíos de la vida en la Luna https://www.youtube.com/watch?v=u_A53QQwbzs

Bases lunares 3, Colonización https://www.youtube.com/watch?v=1-ne2WBy2uE

50 años de Apollo 15 https://www.youtube.com/watch?v=UvpEzgOqyAY

Novedades en la Luna, Luna 25 y Chandrayaan 3 https://www.youtube.com/watch?v=c5TXPi-lVDI

Observación lunar en directo https://www.youtube.com/watch?v=g71m43tjmKg

Zonas brillantes de corta duración en el amanecer lunar
https://www.youtube.com/watch?v=_MCrm4wmTM0&list=PLTC9b72fieqUAbR1OLMk-hZhx238bKJyh&index=3

Cráteres con rayos brillantes (en Luna llena) https://www.youtube.com/watch?v=-5KqLI2mrsc&list=PLTC9b72fieqUAbR1OLMk-hZhx238bKJyh&index=15

Observación amateur de Dorsa lunares
https://www.youtube.com/watch?v=48aa9257olY&list=PLTC9b72fieqUAbR1OLMk-hZhx238bKJyh&index=16

Mercurio y su observación
https://www.youtube.com/watch?v=Tn3IvAQmYEo&list=PLTC9b72fieqUAbR1OLMk-hZhx238bKJyh

Exploración del planeta Venus
https://www.youtube.com/watch?v=7nFz-iCDLJo&list=PLTC9b72fieqUAbR1OLMk-hZhx238bKJyh&index=14

Cometas, viajeros del espacio-tiempo 1
https://www.youtube.com/watch?v=NPr_xj2a3oY&list=PLTC9b72fieqXJNSKUPpy4SV-9LHnPjtUw&index=2

Cometas, viajeros del espacio-tiempo 2
https://www.youtube.com/watch?v=xihQ0ZWJ17w&list=PLTC9b72fieqXJNSKUPpy4SV-9LHnPjtUw&index=3

Cometas, viajeros del espacio-tiempo 3
https://www.youtube.com/watch?v=bNENP7xArkM&list=PLTC9b72fieqXJNSKUPpy4SV-9LHnPjtUw&index=4

Cometas, magnitud visual y fotométrica
https://www.youtube.com/watch?v=SFeJIS7VChA&list=PLTC9b72fieqUAbR1OLMk-hZhx238bKJyh&index=4

Observación de meteoros, las Áridas
https://www.youtube.com/watch?v=optq4-pkXYo&list=PLTC9b72fieqUAbR1OLMk-hZhx238bKJyh&index=17

Trapecio Austral, observando desde Mar del Plata, Argentina
https://www.youtube.com/watch?v=CfjDPcxpVYE&list=PLTC9b72fieqUAbR1OLMk-hZhx238bKJyh&index=5

Cohetería en el aula
https://www.youtube.com/watch?v=K-pEeY6T_AQ&list=PLTC9b72fieqUAbR1OLMk-hZhx238bKJyh&index=6

Fuentes de información y fotos vertidas en la publicación

Benilan Y., Comets, Titan and Mars: Astrobiology and Space Projects, Advances in Astrobiology and Biogeophysics, 2007.

Cottin H, Comets, Titan and Mars: Astrobiology and Space Projects, Advances in Astrobiology and Biogeophysics, 2007.

Exploración de Venus, Cápsula Espacial N° 8, 2018.

European Space Agency (ESA).

Exploración solar, Cápsula Espacial N° 40, 2019.

Dole S., Planetas habitables, Labor, 1972.

Física atmosférica y oceánica, arXiv 2102.08472v1, astro-ph.EP.

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

La Tierra y la astrofísica planetaria, astro-ph.EP.

National Aeronautics and Space Administration (NASA).

NASA/Jet Propulsion Laboratory.

Layman L. - Miller G., CRRES Combined Release and Radiation Effects Satellite Program Summary, MSFC, NASA, 1993.

Méndez R., El satélite CRRES estudia la atmósfera, Aeroespacio Nº 483 (1991).

Misión Cassini-Huygens, Cápsula Espacial N° 64, 2021.

Misión Galileo, Cápsula Espacial N° 19, 2018.

Palazzi R., El primer cometa artificial, Aeroespacio Nº 444 (1985).

Stephen Hummel.

The Combined Release and Radiation Effects Satellite Program, A unique series of scientific experiments, NASA.

Venus revela sus secretos, Ingeniería, Ed. Mashinostroenie, Moscú, 1969.


CAPSULA ESPACIAL REVISTA DIGITAL
CAPSULA ESPACIAL
www.capsula-espacial.blogspot.com